ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e Dei Materiali

TESI DI LAUREA

in
Tecnica e Sicurezza dei Cantieri Viari M

APPLICAZIONE SPERIMENTALE DEL POLVERINO DI GOMMA PER LA REALIZZAZIONE DI STABILIZZATI CON TECNINCA DI RICICLAGGIO A FREDDO CON CEMENTO ED EMLULSIONE BITUMINOSA

TESI DI:
Rocco Salome

RELATORE:
Prof. Ing. **Andrea Simone**

CORRELATORE:

Dott. Ing. **Matteo Pettinari**

Anno Accademico 2011/2012

Sessione

III

A mio Padre

Parole Chiave :

Polverino di gomma da PFU

Riciclaggio a Freddo

Misto Cementato

Addensabilità

ITSM

ITS

INDICE

Introduzione

La strada rappresenta ancora oggi uno dei canali maggiormente utilizzati e privilegiati dall'utenza, sia per trasporto di merci che di persone. Si parla spesso di squilibrio modale, un fenomeno questo, che la UE tenta di arginare attraverso molteplici progetti: linee ferroviarie alta velocità, autostrade del mare etc.. ciò nonostante il trasporto su gomma e soprattutto il suo aumento vertiginoso dal dopoguerra ad oggi, rappresenta ancora uno dei problemi più pressanti del trasporto non solo italiano ma anche europeo.

Per venire incontro a necessità prestazionali, ambientali ed economiche si richiedono sempre più pavimentazioni che siano al contempo performanti, poco impattanti e a costi contenuti. In questo contesto, il ruolo del riciclaggio (soprattutto a freddo) di materiale derivante direttamente da scarifica/fresatura di vecchie pavimentazioni e quello proveniente dal reale esercizio dell'attività di trasporto, ha assunto sempre più un ruolo centrale all'interno della progettazione stradale.

Ogni anno infatti circa 380000 tonnellate di pneumatici arrivano a fine vita utile, lo smaltimento di questi rifiuti, per via delle loro caratteristiche, è caratterizzato da un iter complesso e soprattutto costoso. Il riutilizzo dunque di materiale derivante dalla frantumazione delle gomme opportunamente trattato, come il polverino, potrebbe offrire soluzioni tecniche valide e soprattutto compatibili a livello ambientale.

La prima parte dell'elaborato è incentrata sulla raccolta dei dati e delle norme riguardanti il problema della gestione dei rifiuti derivanti da costruzione e demolizione (C&D), sulla spiegazione delle tecniche di riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali e sul trattamento dei PFU.

La seconda parte, relativa al programma sperimentale oggetto di tesi, ha come scopo quello di fornire indicazioni e riferimenti in merito alla tecnica di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa e cemento, valutando le possibilità di una sua applicazione in combinazione con il polverino di gomma tradizionale, in un ottica di un corretto e potenzialmente più esteso recupero dei pneumatici fuori uso. Il comportamento e la variazione di alcune proprietà meccaniche quali: Capacità di Addensamento, Resistenza a Trazione Indiretta (Indirect Tensile Strenght, ITS) e

Modulo ITSM del materiale (indirect tensile stiffness modulus), ne costituiranno i parametri discriminanti.

La sperimentazione si articola in una prima fase di prequalifica, nella quale verranno studiate le percentuali delle varie pezzature di inerti e leganti e le caratteristiche di resistenza di due misti cementati, uno contenente l'1,5% e l'altro lo 0% in volume, di polverino di gomma, entrambi confezionati in laboratorio, con Pressa Giratoria a 180 giri.

In una seconda fase si studierà il comportamento dello stesso materiale in sito, mediante la realizzazione di una stesa di 80 m di Misto Cementato con polverino e una di 40 m senza, presso il campo prove situato in prossimità della nuova rotatoria sud della Lungosavena, nel comune di Castenaso della provincia di Bologna.

Si valuterà dunque a partire dal confezionamento dei provini tramite laboratorio mobile e presso il laboratorio *DICAM – Strade:* l'addensamento al variare dell'energia di compattazione (180 e 120 giri), la resistenza a Trazione indiretta a 25°C e l'entità dei Moduli ITSM (dopo maturazione in stufa a 40°C), infine l'omogeneità di stesa, mediante l'utilizzo di due apparecchi LWD (Zorn e Dynatest).

Capitolo 1 – Il problema dei rifiuti

1.1 – Sviluppo sostenibile

1.1.1 – Introduzione

Sviluppo sostenibile significa in termini estesi “sviluppo economico e tecnico, sostenibile con l’ambiente”, una crescita che sfrutti le risorse naturali ma che al contempo ne garantisca la conservazione e il miglioramento. Uno sviluppo citando il programma UE “a favore dell’ambiente e di uno sviluppo sostenibile”, in grado di migliorare la qualità della vita evitando danni permanenti all’ambiente. Nel 1987 la World Commission on Environment and Development pubblicò il rapporto Our Common Future, nel quale era introdotto il concetto di sviluppo sostenibile un “approccio integrato alla politica economica per i decenni a venire”, definendolo come uno sviluppo che soddisfi i bisogni presenti senza compromettere l’abilità delle future generazioni di soddisfare i propri.

Altre definizioni sono state suggerite dagli anni 80’ ad oggi dando alla parola sostenibilità diverse interpretazioni, tra tutte quelle suggerite, ne spiccano in particolare due, una più ampia e una più ristretta. La più ampia ingloba al suo interno lo sviluppo sociale, economico ed ecologico, mentre la più ristretta si riferisce principalmente agli aspetti di gestione ambientale e di esaurimento delle risorse nel tempo. L’idea comune che emerge dalle tante definizioni è quella di guardare con maggiore attenzione alla qualità della vita, alla disponibilità delle risorse e alla distribuzione delle ricchezze, vale a dire coniugare tre dimensioni fondamentali e inscindibili dello sviluppo: ambiente, economia e sociale.

Per sostenibilità ambientale si intende la capacità di preservare nel tempo le tre funzioni dell’ ambiente, ovvero: fornitore di risorse, ricettore di rifiuti e la funzione di diretta utilità. La sostenibilità economica invece, può essere definita come la capacità di un sistema economico di generare una crescita continua e duratura degli indicatori economici, in particolare reddito e lavoro.

La sostenibilità sociale, infine, può essere definita come la capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e per genere, in tutta la stratificazione sociale.

La Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente lo Sviluppo (Earth Summit di Rio 1992) segna un passo importante per la discussione e la diffusione del concetto di sostenibilità, dopo la quale molti governi e organizzazioni su scala nazionale, regionale e locale, hanno dato un seguito inserendolo nei rispettivi programmi.

Negli ultimi anni è stato sottolineato come, affinché uno sviluppo sostenibile possa realizzarsi, sia necessario bilanciare accuratamente le richieste economiche, sociali e ambientali: questo concetto è ciò a cui spesso ci si riferisce con "i tre pilastri della sostenibilità".

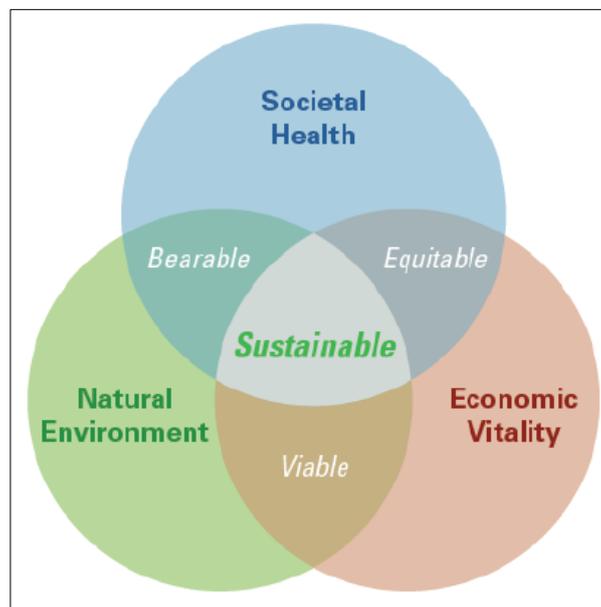



Fig.1.1 - Rappresentazione dei "tre pilastri della sostenibilità"

1.1.2 Concetto di sostenibilità nelle pavimentazioni stradali

Con la considerazione della sostenibilità e delle pratiche sostenibili, la figura dell'ingegnere è spesso costretta a confrontarsi e concentrarsi su una molteplicità di aspetti quali il design strutturale, i materiali della pavimentazione e il processo costruttivo stesso.

Temi come il riciclaggio, uso di scarti/sottoprodotti industriali (fly ash, cemento di risulta, etc.), conservazione delle risorse, inquinamento da CO2 e anche energia associata, tendono ad acquisire notevole interesse in tale contesto. Nasce così la necessità di caratterizzare e quantificare ogni aspetto di un'infrastruttura stradale,

dalla sua concezione e design, alla costruzione, al suo esercizio e manutenzione, fino al raggiungimento della vita utile, in termini sostenibili.

Il miglior modo di determinare la sostenibilità di una scelta infrastrutturale sarebbe quello di impiegare una metodologia che rispetti i tre pilastri, comparando dunque i fattori economici, ambientali e sociali influenzati dalla pavimentazione durante tutta la vita utile. Tale metodologia potrebbe essere usata in diversi modi:

- Analizzare la pratica corrente e valutare i miglioramenti quando vengono introdotti;
- Comparare diversi sistemi e soluzioni su base di giudizio oggettiva;
- Valutare i benefici relativi di approcci alternativi al design, selezione dei materiali, etc.

Una metodologia di valutazione comprensiva sino a tal punto purtroppo non è ancora pronta per essere implementata. Sebbene i fattori economici siano stati identificati e possano essere misurati, un insieme di fattori ambientali sociali appropriati non è ancora stato identificato o meglio non accettato dall'industria, di conseguenza i corrispondenti strumenti di misura non sono solitamente disponibili.

- *Fattori Economici Legati alla Sostenibilità*

Per ogni progetto o sistema la buona pratica ingegneristica bilancia il bisogno di minimizzare costi economici con la necessità di massimizzare efficienza, qualità, e longevità.

Comunque, se i tentativi di minimizzare i costi economici si concentrano solamente sui costi iniziali, gli ingegneri perdono l'opportunità di prendere decisioni fondate che influenzino le generazioni future e la sostenibilità a lungo termine della pavimentazione.

Detto ciò, i costi economici dovrebbero essere analizzati nei riguardi dell'intero ciclo vitale di un sistema adottando un metodo *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Un tale metodo è basato su criteri economici che considerano il valore temporale del denaro, i costi iniziali e quelli futuri previsti, il valore ultimo alla fine del periodo di servizio. La maggior parte degli approcci LCCA utilizzati dalle società appaltatrici

include solamente i costi sostenuti dalle stesse, come i costi di costruzione iniziale, preservazione, riabilitazione, il valore residuo. È possibile e forse auspicabie includere i costi dell'utilizzatore: questi costi includono, per esempio, i costi finanziari di chi transita causati dalla preservazione della strada e dalle attività manutentive. Altri costi economici che possono essere considerati includono i costi finanziari di una tutela ambientale, se si prevede un significativo impatto sull'ambiente.

- Fattori Ambientali legati alla Sostenibilità

Al centro di un’analisi dell’opera con un approccio “inizio-fine” o “end-to-end” c’è l’idea di *Life Cycle Assessment (LCA)*. L’ LCA è scaturito dall’esigenza di tenere cumulativamente conto dell’utilizzo delle risorse e della loro disponibilità, ancora quando negli anni ’60 non era pressante il tema delle risorse energetiche e della preservazione delle risorse.

L’LCA costituisce quindi un passo successivo che ora è in atto, all’interno dello stesso percorso di sviluppo che portò, nel campo economico, all’introduzione del LCCA (Life Cicle Cost Analysis).

L’obiettivo di questo approccio è di assicurare che tutti gli effetti/fattori/carichi etc. siano tenuti in conto nell’analisi, dal momento in cui ogni componente dell’oggetto di studio (la pavimentazione in questo caso) è estratto o processato, lungo tutto il suo percorso, fino all’esaurimento della sua utilità in coincidenza del raggiungimento della vita utile dell’opera. Ciò comporta essenzialmente l’analisi cumulativa dell’impatto ambientale e della sostenibilità di un prodotto attraverso tutti gli stadi del ciclo vitale dello stesso, includendo implicazioni che non sono normalmente tenute in conto in analisi più tradizionali. L’uso del termine *life cycle* si riferisce appunto a tutte le maggiori attività che occorrono nel periodo di vita del prodotto, dalla sua produzione (inclusa l’acquisizione delle materie prime necessarie), uso, e manutenzione, alla sua finale dismissione (EPA, 2006).

La Fig. 1.2 illustra il concetto di LCA, includendo inputs, outputs e i limiti del sistema.

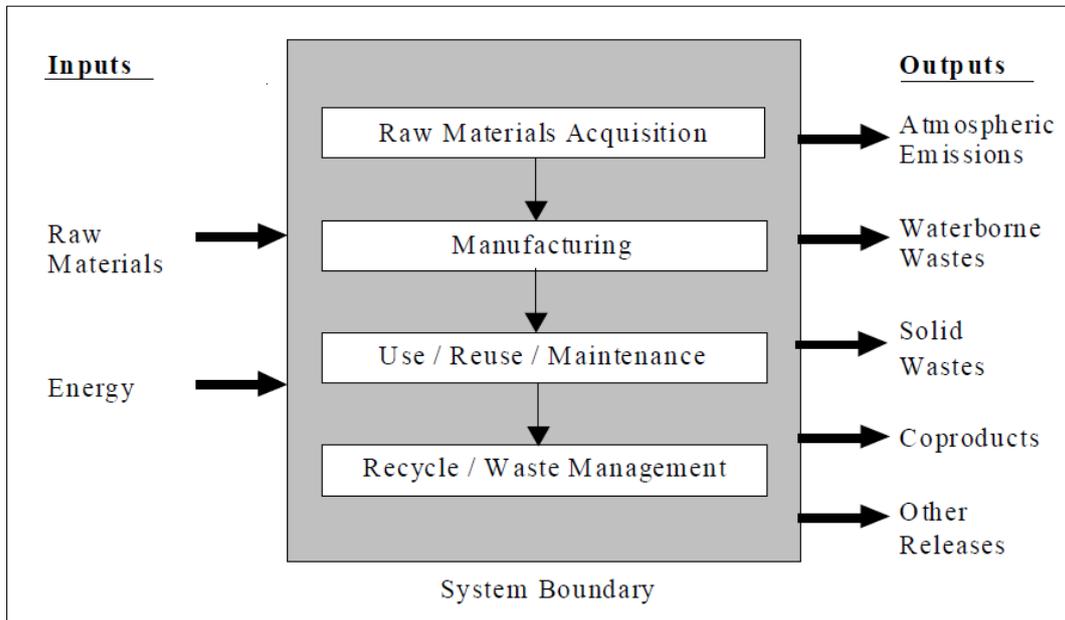



Fig.1.2 - Concetto di Life Cycle Assessment (da EPA, 2006)

È importante sottolineare che questo approccio consente di focalizzare un qualsiasi numero di outputs, inclusi energia, emissioni, materie prime, potenziale nei confronti del riscaldamento globale, acqua sfruttata, materiali pericolosi. Quindi anche se la maggior parte degli approcci odierni non considera fattori come impatto del traffico durante la fase di esercizio della struttura in un'analisi di sostenibilità della stessa (dato che il movimento dei veicolo non è considerato come parte della strada), l'approccio "end-to-end" dell'LCA, descritto precedentemente, evidenzia chiaramente questi risvolti.

Basandosi su questi sforzi e altri, possono essere raccomandati i seguenti parametri di valutazione dell'impatto ambientale di una generica pavimentazione stradale:

- Energia richiesta
- Emissioni / Riscaldamento globale potenziale
- Tossicità potenziale
- Consumo di materie prime

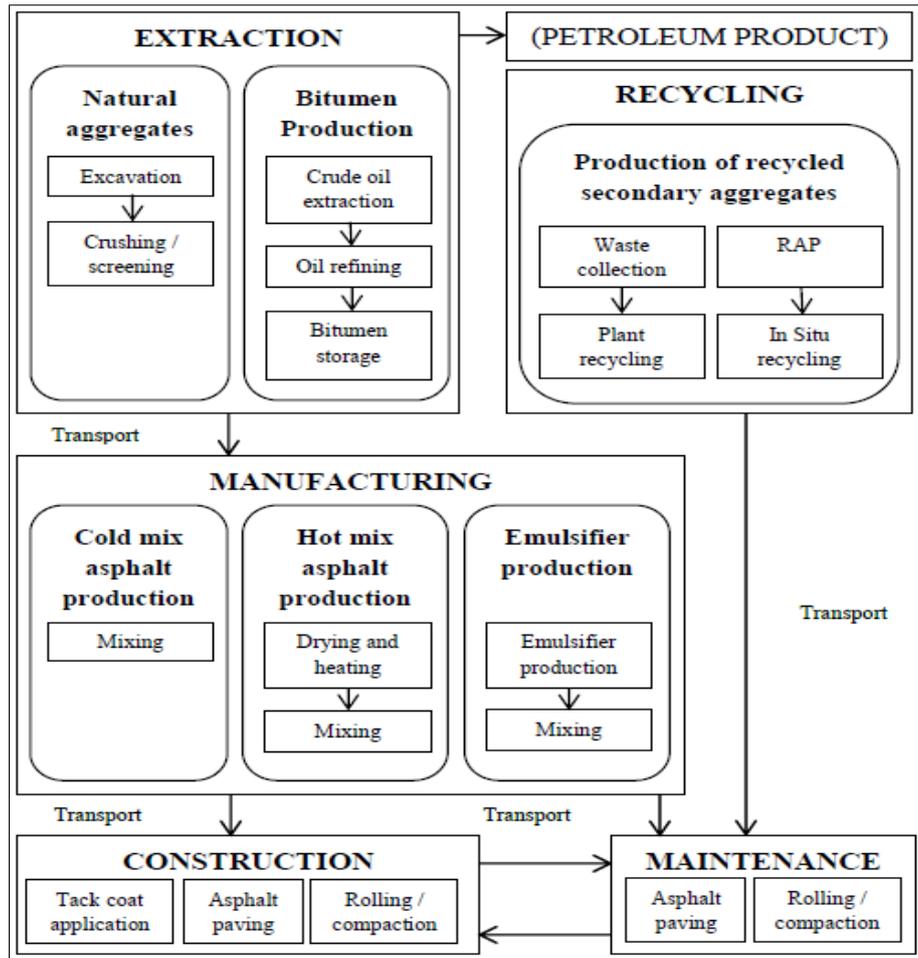



Fig.1.3 - Cinque processi principali che comprendono i limiti del sistema per le pavimentazioni di conglomerato bituminoso

- Fattori Sociali legati alla Sostenibilità

Le società oggigiorno dipendono profondamente dall'abilità delle persone e dei beni di spostarsi rapidamente ed efficientemente da un posto all'altro. La mobilità che le strade consentono è uno dei fattori sociali critici della loro sostenibilità complessiva; un altro fattore sociale è l'effetto delle pavimentazioni sulla qualità della vita delle comunità circostanti (livello estetico, posizionamento, contributo al rumore del traffico, impatti sulla sanità, etc.). Anche se l'industria delle pavimentazioni ha fatto progressi nello sviluppo di strumenti per analizzare due fattori di sostenibilità – LCCAs per analizzare i fattori economici e i nuovi LCAs per quelli ambientali - nessun sistema, oggettivo, è ancora disponibile per valutare i fattori sociali.

I seguenti, sono diversi potenziali parametri che potrebbero essere inclusi in una tale valutazione:

- Sicurezza
- Ritardi dell'utente
- Inquinamento acustico
- Energia associata

La Figura 1.4 seguente riassume il sistema della sostenibilità nel campo stradale.

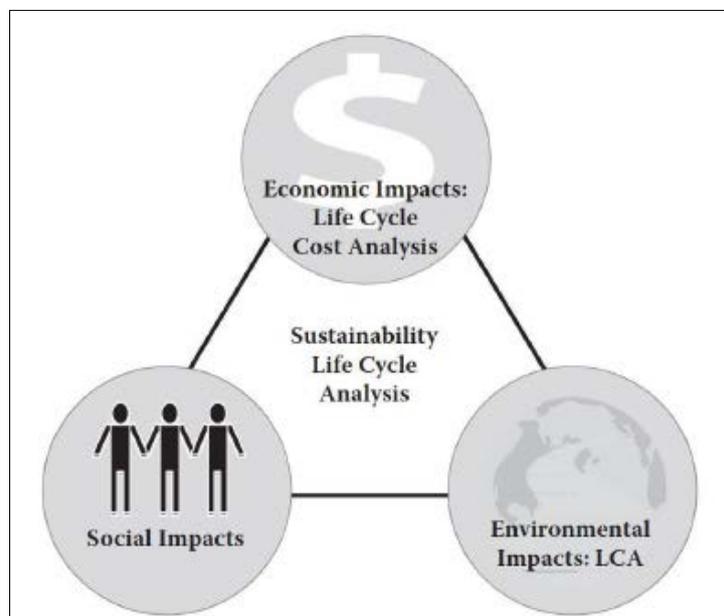



Fig.1.4 - La sostenibilità nelle pavimentazioni stradali

1.1.3 Le politiche pubbliche per la sostenibilità

La Conferenza di Rio de Janeiro del 1992 ha sancito per la prima volta la formalizzazione dello sviluppo sostenibile come obbiettivo prioritario per il ventunesimo secolo e la contestuale approvazione di alcuni documenti fondamentali a supporto del processo, in particolare:

- dichiarazione sull’Ambiente e lo sviluppo;
- agenda 21;
- convezione per la conservazione della biodiversità;
- convezione quadro sui cambiamenti climatici;
- dichiarazione sulla gestione, conservazione e sviluppo delle foreste;

L'Agenda 21 è il documento di natura programmatica e operativa che sintetizza le strategie e le azioni specifiche che i Paesi firmatari si sono impegnati ad attuare per favorire lo sviluppo sostenibile. Il documento indica come la tutela e la valorizzazione dell'ambiente devono essere considerate in modo trasversale rispetto alle politiche sociali ed economiche, puntando quindi a integrare le dimensioni ambientale, economica e sociale. Accanto agli impegni a livello nazionale, viene data grande importanza al ruolo degli enti locali, la loro partecipazione e cooperazione sarà un fattore determinante nel perseguimento degli obbiettivi.

Gli elementi fondamentali del processo di Agenda 21 locale sono: descrizione del quadro diagnostico [1], il Forum [2] e il Piano di Azione Ambientale [3].

In Italia le Agende 21 Locali rappresentano oramai un'esperienza molto diffusa, queste dovrebbero essere supportate da un nuovo auspicio, che passa dall'integrazione delle politiche degli enti di governo locale con gli obbiettivi di sostenibilità. Trasporti, infrastrutture, attività produttive, agricoltura, ambiente e turismo sono alcuni tra gli ambiti principali delle politiche pubbliche che dovrebbero "concertare" obbiettivi e target comuni di sviluppo durevole e sostenibile.

Uno degli strumenti più interessanti a disposizione degli enti locali è poi la contabilità ambientale, il cui obiettivo è sistematizzare le informazioni per poter disporre di dati affidabili su cui basare il processo decisionale e su cui impostare piani e programmi per tale sviluppo. La contabilità ambientale è un sistema che permette di catalogare, organizzare, gestire dati e informazioni sull'ambiente, in unità fisiche e monetarie, con il fine di rappresentare lo stato e le variazioni del patrimonio naturale, le interazioni tra economia e ambiente, le spese destinate alla prevenzione, alla protezione e al ripristino dell'ambiente.

---

[1] Passaggio che può prevedere l'uso di strumenti diversi in relazione al target di riferimento, come ad esempio la *Relazione sullo stato dell'ambiente* che ha l'obbiettivo di diffondere verso un pubblico allargato la conoscenza dello stato di salute del territorio, e la *contabilità ambientale*, che ha come destinatari i funzionari dell'ente locale per la pianificazione e la programmazione della spesa.

[2] È l'elemento centrale del processo di partecipazione e condivisione e dovrebbe coinvolgere i principali stakeholder territoriali e istituzionali.

[3] Coniuga capacità decisionale dell'Ente locale e formazione del consenso dei cittadini; oltre a contenere gli obbiettivi generali e specifici e le azioni da intraprendere per raggiungerli, comprende anche sistemi di valutazione e pubblicazione dei risultati raggiunti.

1.2 - Il problema dei rifiuti

1.2.1 – Introduzione

Il grave problema dello smaltimento dei rifiuti è tipico delle società industrializzate e risulta di non facile soluzione sia per le innumerevoli tipologie di rifiuti, sia per la loro natura e quantità. La prima legge strutturata sui rifiuti e sul loro corretto smaltimento risale in Italia al 1982 e gli attuali scenari, in discussione su tutto il territorio nazionale, sono conseguenza di una legge del 1997, recepita in applicazione di direttive europee. Questo fa capire come, in una società proiettata verso una esasperata ricerca del benessere e del miglioramento della qualità di vita, gli strumenti normativi di livello europeo sono disponibili da poco più di un decennio. Il primo articolo della normativa europea, dettata dal D.Lgs 22/1997, parte dalla definizione di rifiuto e lo definisce come "*qualsiasi sostanza ad oggetto di cui il detentore si disfi o abbia deciso di disfarsi o abbia l'obbligo di disfarsi*".

L'individuazione di che cosa sia un rifiuto rappresenta un "sistema aperto" che, come tale, lascia spazio ad abusi interpretativi. Può accadere che non si abbia l'obbligo di disfarsi di beni, sostanze o materiali residuali di produzione o di consumo, in questo caso si parla di "non rifiuto".

Nei confronti di beni, sostanze o materiali residuali di produzione o di consumo, la situazione di "non rifiuto" può verificarsi solo in due casi:

- se questi possono e sono effettivamente e oggettivamente riutilizzati nel medesimo o in analogo o diverso ciclo produttivo o di consumo, senza essere sottoposti ad alcun trattamento preventivo e senza recare pregiudizi all'ambiente;
- se questi possono e sono effettivamente e oggettivamente riutilizzati nel medesimo o in analogo o diverso ciclo produttivo o di consumo dopo aver subito un trattamento preventivo.

La definizione vigente di "rifiuto" non consente di distinguere né i rifiuti dai prodotti né i rifiuti da smaltire da quelli recuperabili; di qui la necessità di un quadro giuridico trasparente e di definizioni chiare e applicabili in ogni Paese. Tale chiarezza risulta indispensabile per favorire la crescita di un "mercato del rifiuto", che consista nell'abbattimento di ostacoli ai liberi scambi e nella formazione di una maggiore certezza normativa nei confronti delle imprese.

Negli ultimi decenni la produzione di rifiuti è cresciuta in modo spropositato e ora si sta cercando la soluzione per affrontare il problema in maniera degna.

Il tema dei rifiuti si è arricchito di aspetti di grande livello e di contributi intellettuali che hanno portato allo sviluppo di tecnologie avanzate e affidabili e a modelli di gestione di elevata efficienza, tali da garantire una sicura protezione dell’ambiente. Le direttive europee e l’attuale tecnologia consentono di poter vedere il rifiuto come una “risorsa” e hanno collaborato allo sviluppo di queste nuove parole chiave:

- riduzione del quantitativo di rifiuti;
- raccolta differenziata e riciclaggio dei materiali;
- recupero di energia.

Il Catalogo Europeo Rifiuti è un documento necessario per migliorare tutte le attività connesse alla gestione del problema rifiuti, esso costituisce una nomenclatura di riferimento con una terminologia comune per tutta la Comunità Europea.

In sostanza si tratta di un elenco armonizzato di designazione e di codificazione dei rifiuti, soggetto a revisioni e aggiornamenti periodici, sulla base delle nuove conoscenze legate all’attività di ricerca ed in particolare al progresso scientifico e tecnico.

In attuazione delle direttive europee 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio, con l’entrata in vigore del Decreto Ronchi anche l’Italia si è dotata di un sistema legislativo avanzato.

Esso stabilisce che "*la gestione dei rifiuti costituisce attività di pubblico interesse*" e deve "*assicurare un'elevata protezione dell'ambiente e controlli efficaci*"; "*i rifiuti devono essere recuperati o smaltiti senza pericolo per la salute dell'uomo e senza procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente e, in particolare: senza determinare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora; senza causare inconvenienti da rumori o odori; senza danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse, tutelati in base alla normativa vigente*" (Decreto Ronchi, 1997)

La gestione dei rifiuti si conforma ai principi di responsabilizzazione e di cooperazione di tutti i soggetti coinvolti nella produzione, nella distribuzione, nell’utilizzo e nel consumo dei beni che generano rifiuto.

Per il perseguimento di tali attività lo Stato, le Regioni e gli Enti Locali nell'ambito delle opportune competenze adottano ogni azione idonea avvalendosi di soggetti pubblici e privati qualificati, mediante accordi e contratti di programma.

Le metodologie che favoriscono la riduzione dello smaltimento dei rifiuti sono riportate nell'articolo 4 e sono le seguenti:

- rimpiego e riciclaggio;
- forme di recupero per ottenere materia prima dai rifiuti;
- adozione di misure economiche che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti;
- utilizzare principalmente i rifiuti come combustibili o altri mezzi per produrre

1.2.2 – Rifiuti derivanti da Demolizione e Ricostruzione (C&D)

A fianco del problema relativo ai rifiuti solidi urbani, noto a tutti, negli ultimi vent'anni ha acquisito sempre maggiore importanza anche quello riguardante lo smaltimento di rifiuti quali terre e rocce di scavo, materiale derivante dalla costruzione e demolizione di edifici e sovrastrutture stradali, rientranti nella categoria dei rifiuti speciali e che, previo idoneo trattamento, possono essere recuperati e riutilizzati per la costruzione di nuove strade, di ferrovie o come inerti nei calcestruzzi. Lo smaltimento dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) costituisce una determinante negativa dal punto di vista ambientale (occupazione di suolo, possibile inquinamento, spreco di energia e di materia "incorporata" nei rifiuti). Il loro reimpiego può quindi produrre un impatto ambientale positivo, cui si aggiunge la riduzione di effetti negativi sull'ambiente conseguenti alla corrispondente limitazione del prelievo di inerti naturali, con un bilancio complessivo di un'azione di recupero e riciclaggio potenzialmente molto favorevole, considerate le consistenti quantità in gioco.

1.2.2.1 – Lo scenario Europeo

I rifiuti da C&D costituiscono una quota percentuale rilevante della produzione totale di rifiuti in tutti i paesi della Unione Europea; dalle più recenti stime (EU as a Recycling Society Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU, 2009) emerge che i rifiuti da C&D rappresentano circa il 31% in peso di tutti i rifiuti prodotti in Europa, attestandosi ad una produzione annua pari a 850.000 t. In Figura 1.11 è riportata l'evoluzione temporale di tale produzione per abitante, relativamente a diversi paesi dell'unione europea a partire dal 1995 sino alle più recenti stime disponibili.

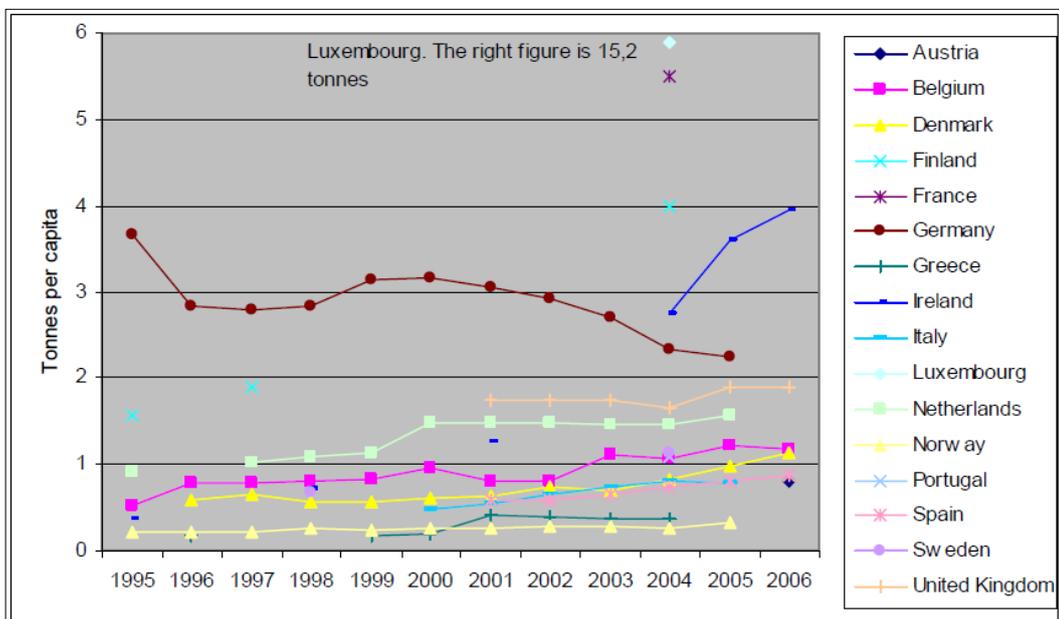



Fig.1.5 - Produzione di Rifiuti C&D per Abitante di alcuni Paesi Europei (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008

La produzione per abitante negli Stati membri e in Norvegia ha una grande variabilità: Francia e Lussemburgo generano 7 e 15 tonnellate per abitante per anno, rispettivamente, Germania e Irlanda si collocano tra 2 e 4 t/ab/a, mentre il resto dei paesi sono nella fascia tra 0,2 (Norvegia) e 2 (Inghilterra). L'Italia si attesta a quota 0,8 t/ab/a. Tutti paesi in cui i dati sono disponibili per più di un anno, esclusa la Germania, hanno visto un incremento di rifiuti da C&D nel periodo dal 1995 al 2006.

Per quanto riguarda la loro composizione, essa risulta molto variabile, sia per la diversa origine, sia in funzione di fattori quali le tipologie e le tecniche costruttive locali, il clima, l'attività economica e lo sviluppo tecnologico del territorio, la

disponibilità locale di materie prime e materiali da costruzione. Le componenti tipiche dei rifiuti da costruzione e demolizione sono: terreno materiale roccioso, ghiaia e materiale da riempimento, calcestruzzo, conglomerati bituminosi, mattoni piastrelle e tegole, legno, intonaco e altre finiture interne, plastiche, metalli, vetro ed alcuni altri rifiuti vari come carta, cartoni, contenitori, etc. in basso è riportata la composizione percentuale relativa dei vari costituenti dei rifiuti C&D per alcuni paesi europei, vecchi e nuovi, secondo orizzonti temporali variabili dal 2000 al 2006. L'Italia, causa la scarsa, frammentata e disomogenea raccolta di dati necessari all'elaborazione di statistiche e indici specifici del settore delle costruzioni e demolizioni, non dispone di dati temporalmente comparabili e pertanto rimane esclusa da tale confronto.

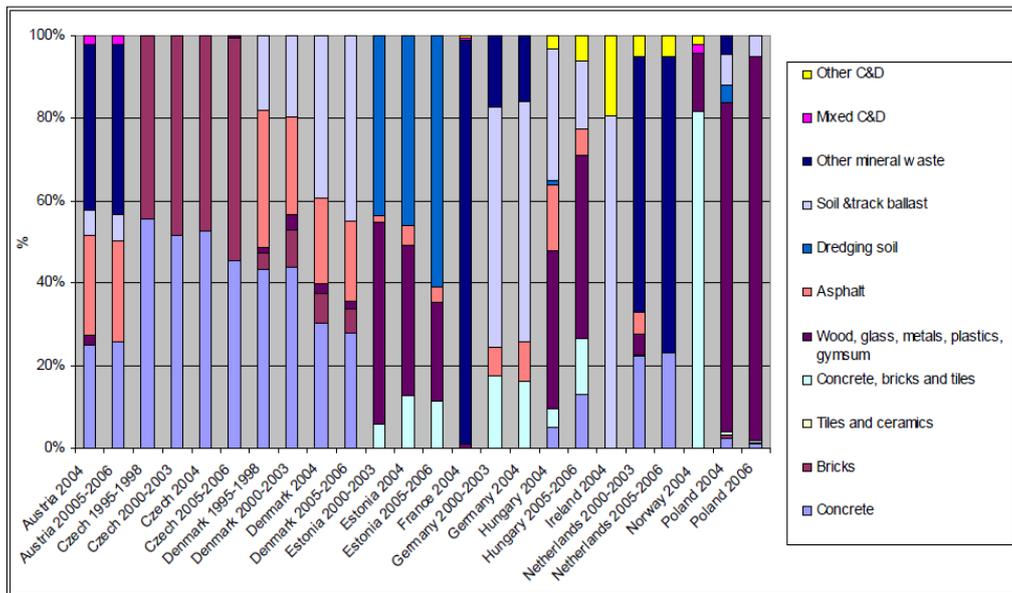



Fig.1.6 - Composizione % dei Rifiuti da C&D e sua Evoluzione Temporale nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

I rifiuti da C&D possono essere suddivisi in tre categorie generali:

- la **frazione riutilizzabile**, costituita da quegli elementi che possono essere riportati alla loro forma precedente e riconvertiti direttamente alla loro funzione originale: finestre, inferriate di balconi, travi, ecc;
- la **frazione riciclabile**, costituita dagli scarti riciclabili o dai rifiuti che, sottoposti a termodistruzione, forniscono energia. Il riciclaggio del materiale concerne soprattutto la frazione litoide, ma non sono esclusi legno non

trattato e metalli, mentre l'utilizzo dal punto di vista termico riguarda i componenti organici, come pavimenti in PVC o legno trattato. A differenza della frazione riutilizzabile, questa frazione non ha conservato né la forma né la funzione originarie;

- la **frazione inutilizzabile**, costituita dai componenti indesiderati presenti nel materiale da riciclare o dalle frazioni che contengono inquinanti, da conferire in discarica o trattare separatamente.

Secondo quanto previsto dalla Direttiva 2008/98/CE (art. 11, comma 2, lettera b), gli Stati membri devono adottare entro il 2020 misure necessarie per promuovere il riutilizzo, il riciclaggio di questa tipologia di rifiuti non pericolosi con obiettivi di recupero pari almeno al 70% in termini di peso. È stato possibile ottenere informazioni sul riciclo dei rifiuti da C&D soltanto per 18 dei potenziali 28 paesi trattati (EU-27 e Norvegia).

La Figura 1.7 mostra i riciclo totale di tali rifiuti per abitante e, dove possibile, il suo sviluppo nel tempo. I paesi con un alto tasso di produzione per persona, come Francia, Germania e Irlanda, hanno un simile alto livello di riciclo, tra 2 e 3,5 t.

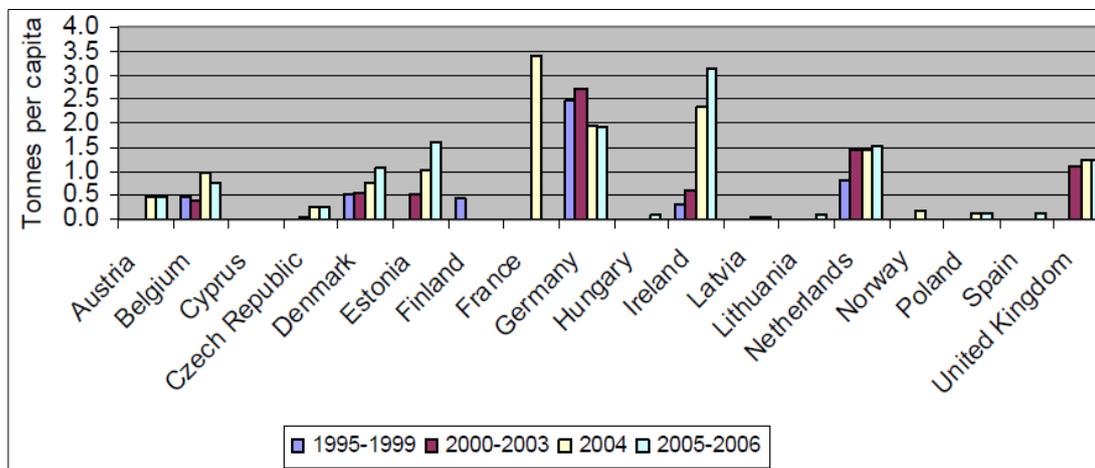



Fig.1. 7 - Riciclo di rifiuti da C&D per Abitante nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

Il maggiore tasso di riciclo a persona per alcuni Stati membri sembra riflettere che i paesi con più alti quantitativi di riciclo si comportino "meglio". Quando il riciclo, però, è rapportato alla produzione totale, questa discriminazione scompare.

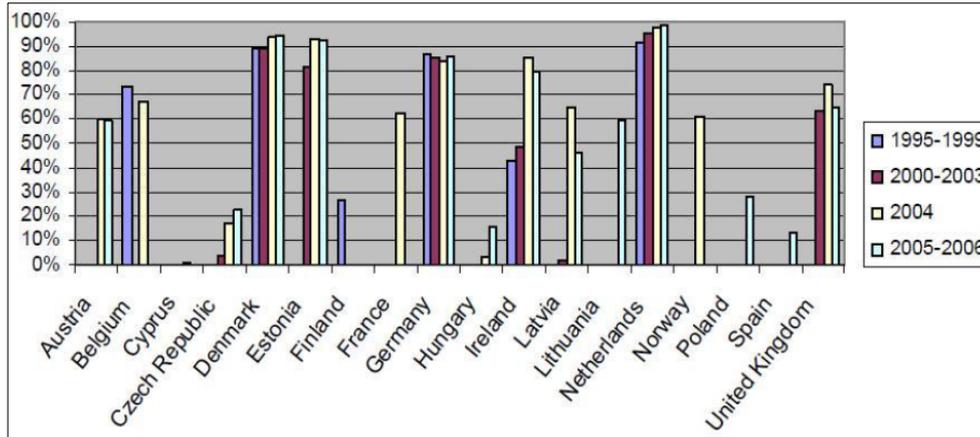



Fig.1. 8 - Riciclo di Rifiuti da C&D per Abitanti, in Percentuale sul Totale Generato, nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

La Figura 1.8 mostra che la maggior parte dei vecchi Stati membri hanno una percentuale di riciclo al di sopra del 60%. Danimarca, Germania, Irlanda e l'Olanda, ma anche l'Estonia, riciclano persino oltre l'80% dei rifiuti da C&D. Durante gli ultimi anni sembra che i tassi di riciclo siano lievemente cresciuti in paesi con già alti tassi di riciclo come Danimarca, Germania, Olanda e Inghilterra. In Repubblica Ceca, Estonia, Ungheria e Irlanda, il livello iniziale e a basso, ma è poi cresciuto maggiormente. L'incremento delle quantità riciclate indica che le politiche nazionali ed europee volte a dirottare i rifiuti avviati alle discariche verso attività di recupero materiale stanno producendo buoni risultati. Condizioni di mercato favorevoli per alcuni materiali di rifiuto possono aver giocato un ruolo favorevole, sebbene informazioni recenti evidenzino come il mercato delle riciclo sia stato negativamente colpito dall'attuale crisi economica, che ha portato a una diminuita domanda di materiali, inclusi i materiali di recupero in generale. Questo potrebbe tradursi, in futuro, in ulteriori sviluppi positivi dei livelli di riciclaggio in Europa. Per quanto concerne la composizione percentuale della frazione riciclata dei rifiuti da C&D, con un occhio di riguardo per gli asfalti, la Figura 1.9 è indicativa della situazione di alcuni paesi europei.

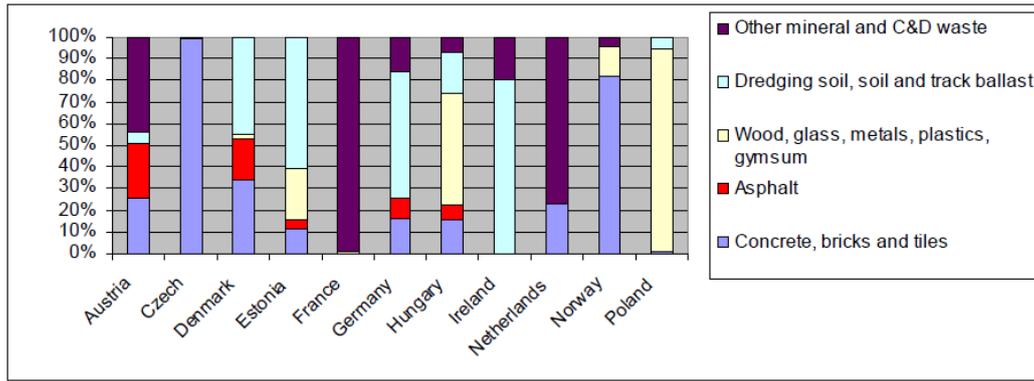



Fig.1. 9 - Composizione della Frazione Riciclata dei Rifiuti C&D per alcuni Paesi Europei (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

1.2.2.2 – Lo scenario Italiano

In attesa che venga reso operativo il nuovo sistema di tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), introdotto con il Decreto ministeriale del 17 dicembre 2009 (pubblicato nella G.U. del 13 gennaio 2010 ed entrato in vigore il giorno successivo) e avente come obiettivo la totale informatizzazione della filiera dei rifiuti speciali, la banca dati MUD (Modulo Unico di Dichiarazione ambientale che tutti i soggetti che producono raccolgono, trasportano e gestiscono rifiuti sono tenuti annualmente a compilare ed inviare alle Camere di commercio ai sensi dell'art. 189 del D. Lgs. 152/2006), ha rappresentato fino ad oggi la fonte dati principale per conoscere e valutare produzione, gestione e flussi dei rifiuti speciali, di cui fanno parte i rifiuti da C&D. La produzione dei rifiuti speciali quindi, anche per il 2009, è stata quantificata utilizzando le informazioni contenute nella banca dati MUD, effettuate ai sensi dell'art. 189 del D. Lgs. 152/2006, precisando che la produzione risulta comunque sottostimata in quanto il sopra citato art.189 prevede l'esonero dall'obbligo di dichiarazione per "le imprese che raccolgono e trasportano i propri rifiuti non pericolosi, di cui all'articolo 212, comma 8, nonché, per i soli rifiuti non pericolosi, le imprese e gli enti produttori iniziali che non hanno più di dieci dipendenti". Per tale motivo i dati MUD, come ogni anno sono stati sottoposti a specifiche procedure di stima elaborate dal sistema delle agenzie ISPRA/Arpa per eliminare i principali errori (quali unità di misura, errori di inserimento dati, attendibilità del dato), tuttavia anche il dato integrato potrebbe risultare ancora parzialmente sottostimato.

La produzione nazionale dei rifiuti speciali si attesta, nell'anno 2009, a circa 128,5 milioni di tonnellate con un calo, rispetto al valore rilevato nel 2008, pari al 7,3%

circa. Il dato complessivo tiene conto sia dei quantitativi derivanti dalle elaborazioni MUD che di quelli stimati (Rapporto Rifiuti Speciali Edizione 2011, Rapporti 155/2012).

La produzione dei rifiuti speciali non pericolosi desunta dalle elaborazioni MUD risulta pari, nel 2009, a circa 52,6 milioni di tonnellate (Tabella 1.1, Figura 1.10). A questi vanno aggiunti circa 8,7 milioni di tonnellate relativi alle stime integrative effettuate per il settore manifatturiero e per quello sanitario e circa 56,7 milioni di tonnellate di rifiuti inerti, interamente stimati, afferenti al settore delle costruzioni e demolizioni, per una produzione totale di rifiuti speciali non pericolosi pari a circa 118,2 milioni di tonnellate (incluse 181 mila tonnellate circa di rifiuti con attività ISTAT non determinata).

Tipologia	Quantitativo annuale (t)			
	2006	**2007**	**2008**	**2009**
Rifiuti speciali non pericolosi esclusi i rifiuti stimati (MUD)	73.409.256	63.415.208	56.322.398	52.637.229
Rifiuti speciali non pericolosi esclusi i rifiuti stimati da C&D (integrazioni stime)		8.803.958	9.175.547	8.688.731
Rifiuti speciali non pericolosi da C&D (stime)	52.082.805	53.202.433	61.720.058	56.680.750
Rifiuti speciali non pericolosi con attività ISTAT non determinata (MUD)		48.351	65.559	180.749
Totale non pericolosi	**125.492.061**	**125.469.950**	**127.283.562**	**118.187.459**
Rifiuti speciali pericolosi (MUD)	10.560.991	9.794.419	10.050.409	8.689.192
Vaicoli radiati per demolizione (stime)		1.556.765	1.229.921	1.610.137
Rifiuti speciali pericolosi con attività ISTAT non determinata (MUD)		10.026	10.925	15.313
Totale pericolosi	**10.560.991**	**11.361.210**	**11.291.255**	**10.314.642**
Rifiuti speciali con CER non determinato (MUD)		4.508	6.992	3.461
Totale rifiuti speciali	**136.053.052**	**136.835.668**	**138.581.809**	**128.505.562**

Tab.1.1 - Produzione Nazionale di Rifiuti Speciali, anni 2006-2009 (Fonte: ISPRA)

L'analisi dei dati per attività economica (secondo la classificazione Ateco 2002) evidenzia che il maggior contributo alla produzione complessiva dei rifiuti speciali è dato dal settore delle costruzioni e demolizioni (Codice Ateco 45) nella quota di 59.173.322 t (58.828.670 t NP MUD + Stime, 344.652 t P) su un totale di rifiuti pericolosi complessivo di tutte le attività economiche pari a 128.505.562 t (118.187.459 t NP MUD + Stime, 10.314.642 t P), con una percentuale, nell'anno 2009, pari al 46,1% del totale prodotto.

	2006	2007	2008	2009
RS CER nd	0	5	7	3
RS P	10.561	11.361	11.291	10.315
RS NP da C&D	52.083	53.202	61.720	56.681
RS NP esclusi C&D	73.409	72.268	65.564	61.507

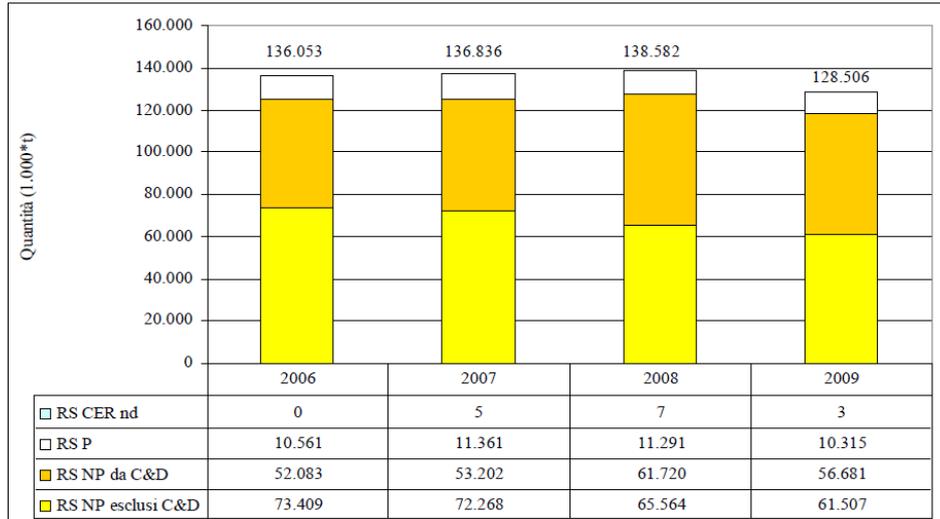



Fig.1. 10 - Produzione Nazionale di Rifiuti Speciali, anni 2006-2009 (Fonte: ISPRA)

Relativamente ai soli rifiuti speciali non pericolosi la ripartizione percentuale tra le diverse attività riflette, come ipotizzabile in considerazione dell'elevata incidenza di tale tipologia di rifiuti, la distribuzione dei dati di produzione totale; i rifiuti non pericolosi rappresentano, infatti, quasi il 92% del quantitativo complessivo di rifiuti speciali annualmente prodotti, e ciò si traduce, per il settore delle costruzioni e demolizioni, in una copertura percentuale pari al 49,8% circa del totale dei RS NP (Figura 1.11).

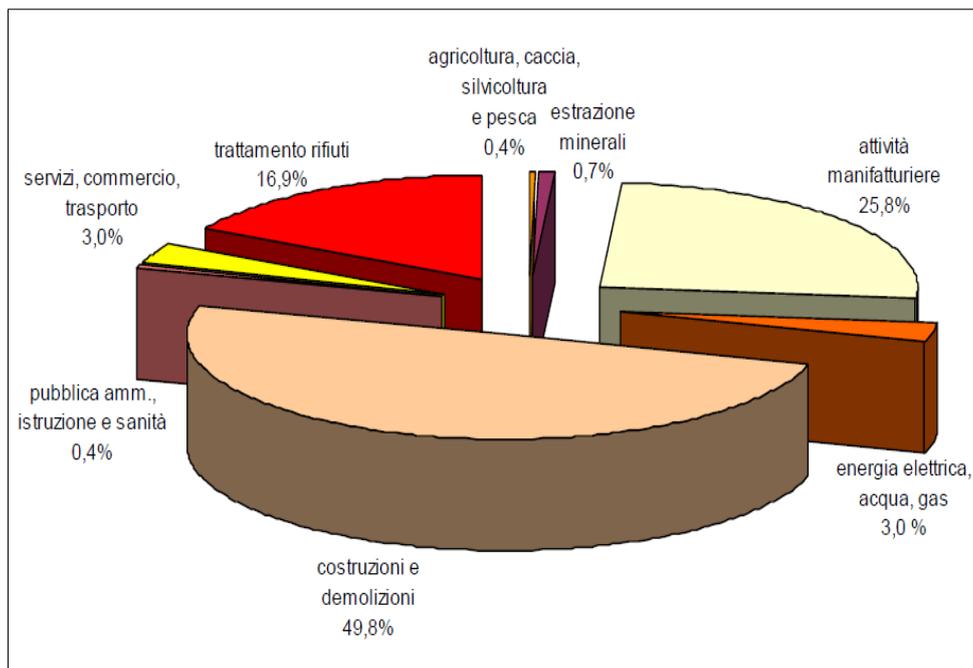



Fig.1.11 - Ripartizione Percentuale della Produzione dei Rifiuti Speciali non Pericolosi per Attività Economica, anno 2009 (Fonte: ISPRA)

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
RS non pericolosi	98,8	100	99,7	99,9	27,2	87,3	34,6	90,9	5,8	95,0	31,3	89,7	0	0	97,6	62,9	98,6	9,2	83,8	99,6
RS pericolosi	1,2	0	0,3	0,1	72,9	12,7	65,4	9,2	94,2	5,1	68,7	10,3	100	100	2,5	37,1	1,4	90,8	16,2	0,4

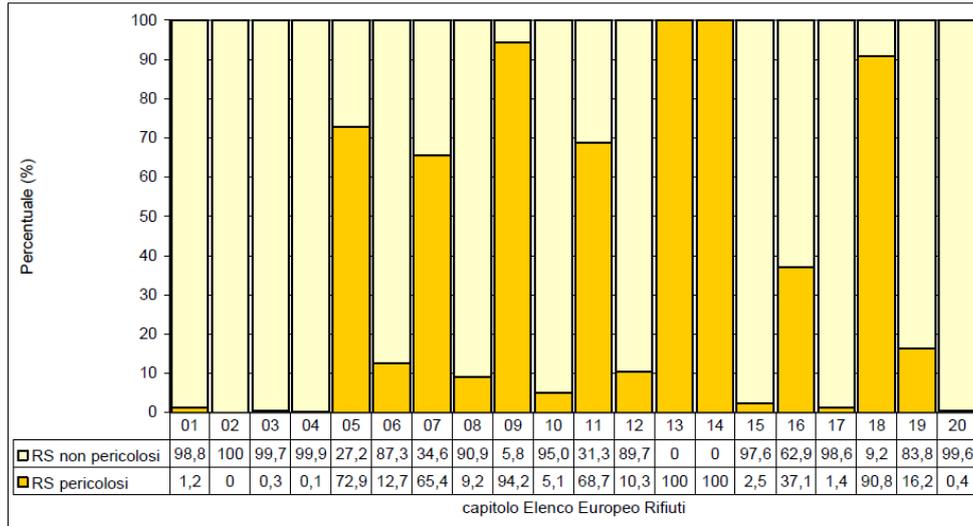



Fig.1. 12 - Ripartizione Percentuale della Produzione dei RS tra Rifiuti Pericolosi e non Pericolosi per Capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti, anno 2009 (Fonte: ISPRA)

Per quanto riguarda i dati sulla produzione dei rifiuti speciali non pericolosi da costruzione e demolizione stimati da ISPRA si può rilevare una soddisfacente correlazione tra gli stessi e l'andamento del prodotto interno lordo del settore (valori a prezzi correnti, dati ISTAT).

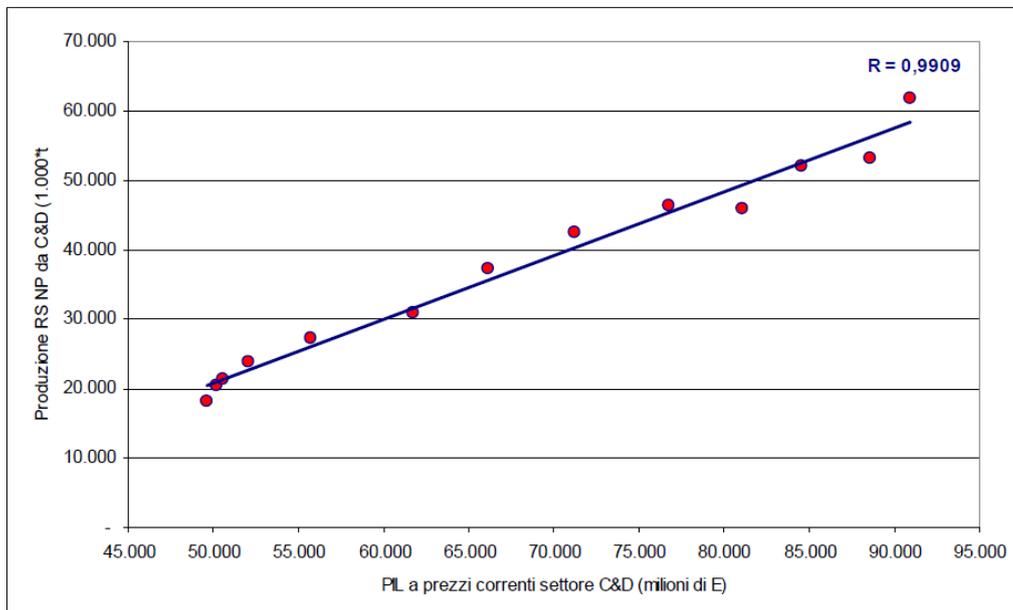



Fig.1 13 - Relazione tra Produzione di RS da C&D non Pericolosi e PIL a Valori a Prezzi Correnti (anni 1996-2009)

Infatti, come emerge dalla Figura 1.13, mettendo in relazione i due indicatori per il periodo 1996-2009, si ottiene un valore di R pari a 0,9909, che suggerisce la sussistenza di una regressione di tipo lineare. Una buona correlazione si osserva

anche tra il dato di produzione dei rifiuti e quello afferente alle unità di lavoro del settore, espresse come valori medi annui in migliaia. In tal caso si riscontra un valore di R pari a 0,9826 (Figura 1. 20).

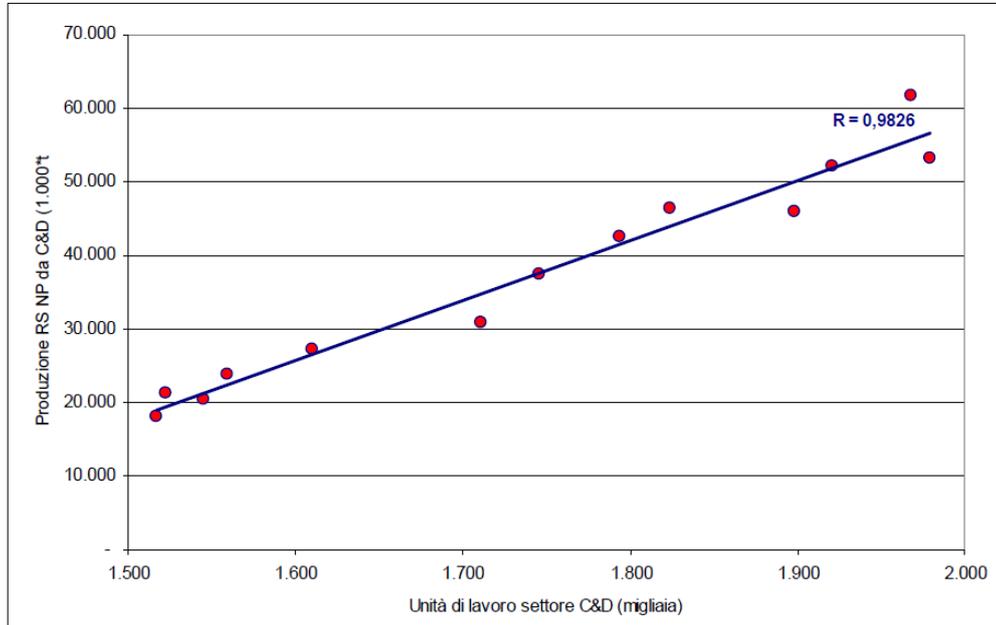



Fig.1.14 - Relazione tra Produzione dei RS da C&D non Pericolosi e Unità di Lavoro del Settore (anni1996-2009)

1.2.2.3 – Composizione dei rifiuti da C&D

Per quanto attiene la composizione dei rifiuti C&D, le stime sono molto incerte, oltreché ormai datate; a titolo indicativo se ne dà comunque informazione.

Rispetto alla provenienza, da alcuni Autori [Mazza, G.D.; I rifiuti da cantiere edilizio: possibilità di riciclaggio; in RS-Rifiuti Solidi, anno VII- numero 6, nov-dic 1993, citato in Rigamonti, Ennio; Dati quantitativi e qualitativi sulla produzione di rifiuti da C&D; in: La gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione; Istituto per l'Ambiente, Milano, 1995 (Rapporto 95/02)] è ritenuta realistica una ripartizione che attribuisce rispettivamente alle attività di demolizione il 90% circa del quantitativo (in peso) di rifiuti C&D prodotti, il 5÷7% alle attività di manutenzione e il 2÷3% alle attività di costruzione.

Per quanto attiene invece la natura e le caratteristiche dei rifiuti C&D - e quindi la loro composizione media - le informazioni reperibili in letteratura sono disomogenee e lacunose: i dati riferiti alla situazione di Paesi stranieri non sono direttamente

confrontabili con l’Italia a causa di differenze spesso rilevanti nei materiali e nelle tecnologie di costruzione e dunque nei rifiuti prodotti.

La Tabella 1.3 seguente, riassume le informazioni disponibili in materia di composizione media dei rifiuti C&D: di particolare rilievo sono i laterizi e calcestruzzi che costituiscono, insieme, l’80% del totale [Jacobsen, G.B.; Quantitativi, composizione e riciclaggio degli scarti di costruzione e demolizione in Europa; in: RS-Rifiuti Solidi, anno 6, n.2 , marzo 1992].

Di minore entità, ma non di importanza, sono i conglomerati bituminosi derivanti da scarifica stradale.

Categoria di Rifiuto	% in Peso sul Totale
Calcestruzzo	30.0
Calcestruzzo non armato	10.0
Calcestruzzo armato	20.0
Laterizio (tegole, mattoni, forati)	50.0
Asfalti	5.0
Scavi	6.0 – 10.0
Carta e cartone	0.6 – 4.0
Metallo	3.0
Varie	1.0 – 1.4

Tab.1.2 - Composizione Rifiuti C&D Italiani (Fonte: Jacobsen, 1992)

Secondo le stime allora elaborate dall’European Demolition Association (EDA) invece, gli asfalti rappresenterebbero una percentuale doppia, pari al 10% (Tabella 1.2).

Tipologia	% in Peso sul Totale
Calcestruzzo	45
Laterizi	35
Asfalto	10
Altri (metalli, legno, … etc.)	10

Tab.1.3 - Composizione Rifiuti C&D Italiani, anno 1992 (Fonte: EDA, 1992)

Molti autori prevedono che nei prossimi decenni si assisterà ad un aumento sempre crescente di produzione di rifiuti C&D dovuto essenzialmente allo scadere della vita utile di vari manufatti attualmente in esercizio.

Tali rifiuti deriveranno da diverse attività quali la costruzione, l'ampliamento, la ristrutturazione, la manutenzione e la demolizione di opere civili o di infrastrutture viarie. Essi sono prevalentemente costituiti da materiali inerti classificabili come rifiuti speciali non pericolosi (CER e D.L. 22/97).

Valorizzare questi ingenti quantitativi potrebbe ridurre considerevolmente l'impatto ambientale generato dalle attività di C&D, innescare positivi processi di innovazione delle tecniche e di qualificazione degli operatori, offrire interessanti opportunità occupazionali. Tuttavia, la gestione ambientalmente sostenibile dei residui prodotti dalle attività C&D trova parecchi ostacoli, di natura sia tecnica (procedure di demolizione, modalità di separazione, sistemi di raccolta e movimentazione), sia non-tecnica (normativi, culturali, economici, organizzativi), che possono essere superati solo creando un sistema di convenienze reciproche fra i diversi operatori coinvolti nel ciclo di produzione – riciclaggio – riuso – smaltimento dei residui.

Fino al Decreto Ronchi, la politica adottata dal nostro paese per i rifiuti derivanti dalla costruzione e demolizione è stata quella dell'abbandono in luoghi non autorizzati. Tale situazione si è venuta a creare, sia per la sporadica presenza di discariche autorizzate sull'intero territorio, sia per la quasi totale mancanza delle norme giuridiche in materia di smaltimento di rifiuti.

La mancanza di una pianificazione e di una disciplina di dettaglio nelle modalità di coltivazione degli inerti, e lo scarso interesse verso la salvaguardia dell'ambiente e del territorio hanno però indotto gli organi competenti a imporre leggi sempre più restrittive per l'apertura di nuove cave e lo sfruttamento di quelle già esistenti. Infatti, sull'esempio di altri Paesi e sotto la spinta di importanti esigenze pratiche, anche in Italia, negli ultimi anni '80, passando per il D.L.22/97, si è avviato il fenomeno del riciclaggio dei rottami edilizi in risposta alle problematiche ambientali [Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, *"Riciclo di rifiuti da demolizione:un contributo all'ecobilancio", Palermo, 1998*].

Lo smaltimento in discarica, che rappresenta purtroppo ancora la via preferenziale cui sono indirizzati i rifiuti inerti, non è solo un costo ambientale diretto, quello della discarica, ma è anche una potenziale premessa all'abbandono e allo smaltimento abusivo.

Il modo migliore per contrastare gli abbandoni e gli smaltimenti illeciti è quello di costruire un ciclo di recupero dei rifiuti ben funzionante, efficace ed economico.

Partendo da un sistema di recupero ben avviato, con numerosi operatori economici già presenti nel settore, è possibile, incoraggiando buone pratiche, buone tecnologie e gestioni più efficienti, non solo recuperare una quota maggiore dei rifiuti prodotti che sfuggano ai controlli, ma migliorare efficacia e redditività economica delle attività di recupero, ottenendo maggiori prodotti riutilizzabili e prodotti di migliore qualità che consentono un doppio vantaggio: sostituire effettivamente materie prime vergini, con risparmio di cave e territorio, spuntare prezzi migliori e una significativa capacità di affermarsi sul mercato [Iacuzzi R., *"Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie", AIAT*].

L'accezione di *compatibilità ambientale* dimostra che il rispetto dell'ambiente può incontrare, in un percorso sinergico, l'interesse economico di un settore articolato come è quello delle costruzioni edili e civili.

Tenere distinte terre e rocce di scavo dagli altri materiali di risulta, separare i materiali lapidei inerti dagli altri prodotti di demolizione (metalli, legno ecc.), perseguire cioè la demolizione selettiva, significa recuperare buona parte di ciò che fino a ieri era solo rifiuto, riutilizzarla come nuova *materia prima* e quindi come un bene che ha un valore.

Dai rifiuti di costruzione e demolizione si ricavano eccellenti materiali inerti riciclati, che possono essere efficacemente impiegati in sostituzione di quelli naturali in molte opere, pubbliche e private (Figura 1.21). A ciò si aggiungono altri due fondamentali vantaggi: il *risparmio di territorio*, per la mancata realizzazione di nuove cave e discariche, ed il *risparmio energetico e idrico.* La produzione di inerte riciclato richiede infatti un minore impiego di energia e acqua, oltre alla riduzione della necessita di trasporti con mezzi pesanti.

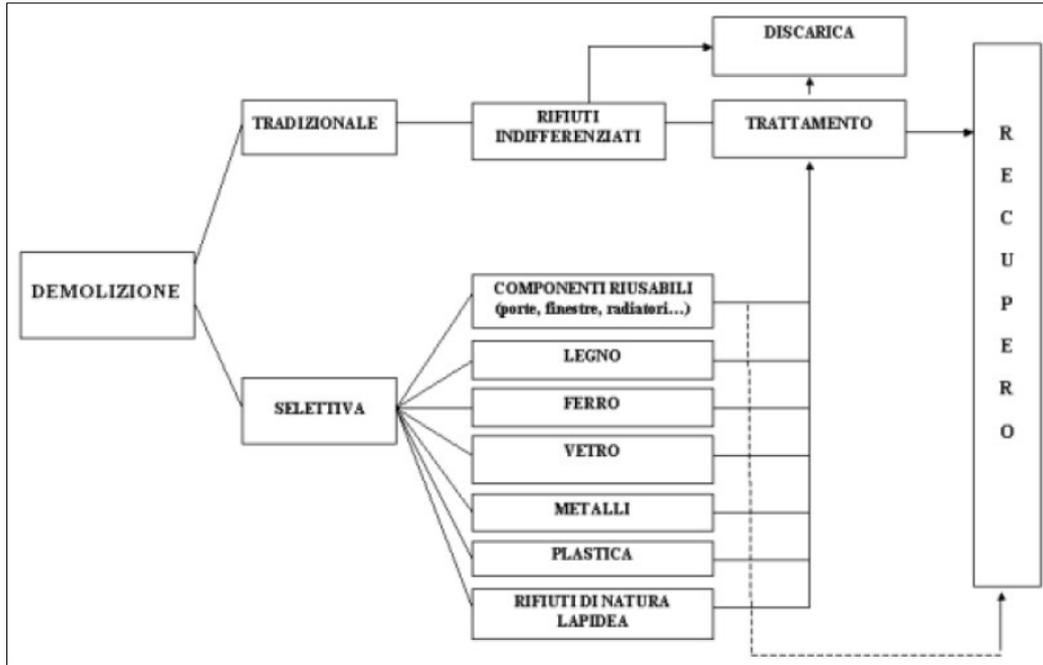



Fig.1. 15 - Flusso dei Rifiuti da C&D (Fonte: Guidelines on Ind . C&D Waste)

Il processo di produzione dell'aggregato riciclato a partire dai rifiuti da C&D non è molto diverso da quello con cui si ottengono gli inerti naturali di frantumazione dal trattamento di blocchi lapidei provenienti da attività estrattiva e non comporta sostanziali costi aggiuntivi anzi un risparmio energetico (Tabella 1.4).

Tale processo consiste in tre fasi, sulle quali si basano gli schemi di funzionamento degli impianti per il trattamento delle macerie: la selezione del materiale; la decontaminazione; la riduzione delle pezzature.

Energia (KW/h)	**Tipologia di Attività**	
	Cava di Pietra Naturale	**Impianto di Riciclo di Rifiuti da C&D**
Energia per la Frantumazione*	2.5	2.0
Energia per l’Estrazione#	4.0	---
Energia per la Movimentazione#	3.0	0.2
Energia per la Vagliatura*	Inclusa nella Frantumazione	0.2
Energia per la Depolverizzazione	---	0.7

* Energia in KW/h, riferita ad 1 t di inerte
# Energia in KW/h, riferita ad 1 m^3 di inerte

Tab.1. 4 - Consumi Energetici Stimati per le Varie Fasi di Lavorazione (Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, 2000)

Tali impianti possono essere di tipo semovente (su mezzo gommato o cingolato), di tipo mobile (trasportati per mezzo di rimorchi), oppure fissi.

Le installazioni fisse potrebbero avere lo svantaggio di essere localizzate in una zona distante dal cantiere di demolizione, tuttavia l'onere legato al trasporto delle macerie viene compensato dalla maggiore produttività e dalla migliore qualità del prodotto.

Una corretta dislocazione sul territorio degli impianti fissi sarebbe in tal senso auspicabile e permetterebbe di abbassare il costo dell'inerte di riciclo.

Nel caso dei conglomerati tale operazione può avvenire direttamente in situ azzerando del tutto l'influenza di tale componente di flusso sia sull'ambiente che sui costi economici.

1.2.2.4 – Il Recupero dei rifiuti da C&D

Per quanto riguarda il recupero di tali materiali, con informazioni ormai datate anche sotto questo aspetto, mettendo in relazione la stima del mercato potenziale dei detriti prodotti, elaborata dal CRESME (1998), con i dati forniti dalle 268 imprese di gestione delle discariche autorizzate per rifiuti speciali inerti e di impianti per il trattamento di macerie, si deduce che in Italia solo l'8,8% del totale dei detriti viene riutilizzato o recuperato.

In tal senso si riscontra un certo ritardo rispetto agli altri paesi europei: infatti, già nel 1990 secondo le stime della European Demolition Association (E.D.A.), in Olanda veniva recuperato o riutilizzato il 60% del totale dei detriti, in Gran Bretagna il 42%, in Belgio il 38% e in Germania il 16%. Un ulteriore aggiornamento di tali dati all'anno 1999 è reperibile nel documento redatto dalla Commissione Europea DG ENV.E.3, del 4 Aprile 2000 ed è stato riportato in Tabella 1.5.

Stato Membro	Produzione di C&D (migliaia di tonnellate)	% materiale riciclato	% materiale conferito in discarica o inceneritore
Germania	59	17	83
Gran Bretagna	30	45	55
Francia	24	15	85
ITALIA	20	9	91
Spagna	13	< 5	> 95
Olanda	11	90	10
Belgio	7	87	13
Austria	5	41	59
Portogallo	3	< 5	> 95
Danimarca	3	81	19
Grecia	2	< 5	> 95
Svezia	2	21	75
Finlandia	1	45	55
Irlanda	1	< 5	> 95
Lussemburgo	-	-	-
TOTALE	180	28	72

Tab.1. 5 - Statistiche di Produzione Rifiuti C&D a Livello Europeo (dati aggiornati al 1999 a cura del Symonds Group)

I dati relativi all'Italia sono molto al di sotto della media europea, con solo il 9% dei rifiuti recuperati e oltre il 90% smaltiti senza alcuna valorizzazione e, per una quota certo non trascurabile, anche in modo abusivo.

Il mercato nazionale dei rifiuti da C&D rimane quindi ancora bloccato, rappresentando di riflesso un problema soprattutto per gli ingenti quantitativi di prodotti (allora, intorno ai 40-46 milioni di tonnellate all'anno mentre, secondo le stime più recenti, oggi tale produzione si attesta a quota 56-61 Mt/a circa).

Le cause di questo ritardo possono essere quindi ritrovate in una serie di motivi che si oppongono ad una diffusione delle tecniche di riciclaggio, tra cui permane la lentezza delle Amministrazioni a recepire le innovazioni tecniche e a modificare quei capitolati, nei quali, si preferisce fare riferimento all'impiego esclusivo di materie prime naturali.

Allo scopo di superare i vincoli formali e le resistenze culturali, appare opportuno integrare la normativa tecnica esistente mediante la definizione di specifici criteri di accettabilità di tali materiali e più efficacemente, informare progettisti, stazioni

appaltanti e direttori dei lavori, sulle reali caratteristiche prestazionali dei materiali in questione.

1.3 – Pavimentazioni stradali e loro deterioramento

1.3.1 – Il pacchetto stradale

Alcuni rifiuti da C&D, come ad esempio il fresato, nell'ottica di uno sviluppo sostenibile rappresentano un'ottima materia prima in grado di sostituire la materia prima vergine nella costruzioni delle tradizionali pavimentazioni stradali.

La pavimentazione stradale deve svolgere tre funzioni fondamentali:

- garantire una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile;
- ripartire sul terreno le azioni statiche e dinamiche dei veicoli, in modo da non determinare deformazioni permanenti dannose alla sicurezza del moto;
- proteggere il corpo stradale dagli agenti atmosferici che possono provocare instabilità del piano viabile.

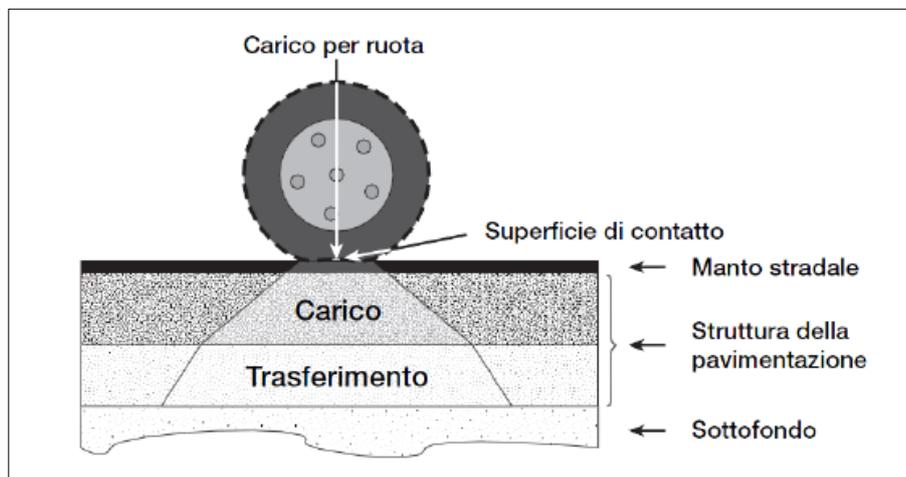



Fig.1.16 - Trasferimento del carico tramite la struttura della pavimentazione stradale

Le pavimentazioni stradali sono costituite da tre componenti principali: il manto, la struttura e il sottofondo, ognuno di essi con uno scopo ben specifico:

Manto della Pavimentazione

Il manto stradale, che costituisce l’interfaccia con il flusso del traffico e l’ambiente, serve a proteggere la struttura della pavimentazione da entrambi questi elementi, offrendo durata nel tempo e impermeabilità.

- Protezione dal traffico

  La rotazione dei pneumatici incide sul manto superficiale in due modi:

  - le sollecitazioni trasmesse al manto dai carichi delle ruote sono prevalentemente sul piano verticale; tuttavia, la componente orizzontale può rivelarsi un fattore importante, in particolare nelle curve, nelle forti pendenze e nei casi in cui l’impianto frenante subisca un danno. Il materiale impiegato per la realizzazione del manto stradale deve possedere caratteristiche di resistenza tali da consentirgli di far fronte a tutte le citate sollecitazioni senza subire rotture da compressione o deformazioni;
  - l’azione di sfregamento esercitata dai pneumatici, in particolare quando si affronta una curva, tende ad abradere la superficie stradale. Col tempo, questo effetto di levigatura provoca una riduzione delle proprietà di attrito (resistenza allo slittamento) del manto che diventa scivoloso, specialmente se bagnato, e quindi pericoloso.

- Protezione dall’ambiente

  Come descritto il manto stradale è continuamente soggetto a due forme principali di attacchi da parte dell’ambiente: gli effetti termici e il «deterioramento provocato dal sole». Il manto, quindi, deve possedere le seguenti due proprietà:

  - Elasticità: consente al manto di dilatarsi e contrarsi ripetutamente in base alle variazioni termiche;
  - Durata: permette al manto di assorbire il quotidiano bombardamento dei raggi ultravioletti senza invecchiare precocemente.

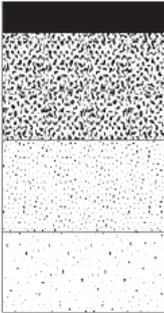
Il bitume è uno dei materiali più frequentemente utilizzati per i manti stradali in quanto si contraddistingue per flessibilità, durata ed elevata impermeabilità.

L’asfalto a caldo (con una quantità di bitume pari a ~ 5%) viene generalmente adoperato per realizzare i manti stradali di prima qualità delle strade a traffico intenso, mentre i più economici trattamenti superficiali che impiegano l’impermeabilizzante a scagliette vengono utilizzati in quei casi in cui il traffico automobilistico è ridotto.

Struttura della Pavimentazione Stradale

La struttura della pavimentazione ha il compito di trasferire il carico dal manto al sottofondo. Come si osserva nella Figura 1.16, il carico per ruota a livello del manto viene in realtà ridotto all’interno della struttura in quanto distribuito su un’ampia area del sottofondo.

La struttura della pavimentazione si compone sempre di vari strati di materiale aventi caratteristiche di resistenza differenti; ogni strato ha la funzione di distribuire il carico che riceve dalla parte superiore su un’area più ampia della parte sottostante. Gli strati posti nella parte superiore della struttura sono soggetti a livelli di sollecitazione maggiori rispetto agli strati inferiori e quindi devono essere costruiti con materiali più resistenti.

	Ubicazione nella struttura	**Realizzato con**
Strati tipici della pavimentazione	Manto Stradale	Asfalto / Impermeabilizzante
	Base	Asfalto / bitume stablizzante / Cemento stabilizzato / granulare
	Fondazione	Bitume stabilizzato / cemento stabilizzato / granulare
	Sottofondo	Cemento stabilizzato / granulare / materiale in situ

Tab.1. 6 - Strati Tipici della Pavimentazione

Il tipo di reazione del materiale ad un carico impartito dipende in larga misura dalle proprietà elastiche del materiale e dalle caratteristiche del carico (ampiezza, ritmo di caricamento, ecc.).

Si citano di seguito le caratteristiche importanti:

- I materiali granulari, che includono pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli, o armatura, della struttura. L'attrito inter-granulare conserva l'integrità strutturale ma, in caso di ripetuti caricamenti (spesso associati ad un incremento del contenuto di umidità), si verifica un graduale processo di addensamento man mano che i granuli si avvicinano gli uni agli altri. Questo fenomeno può avere luogo in qualsiasi livello della struttura della pavimentazione provocando una deformazione della superficie. Tale deformazione si manifesta di norma sotto forma di solchi che si formano nelle aree di impronta delle ruote.

- I materiali legati, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, agiscono piuttosto come una soletta. L'applicazione di un carico verticale sulla superficie di una soletta genera sollecitazioni di compressione orizzontali nella metà superiore della soletta e una sollecitazione di trazione nella metà inferiore, con sollecitazioni massime nelle parti alte e in quelle basse. La deformazione provocata da queste sollecitazioni, in modo particolare quella derivante da sforzi di trazione nella parte inferiore, causa infine un tipo di rottura da fatica per effetto delle numerose ripetizioni del carico. Si tratta di incrinature che si formano nella parte inferiore dello strato e che tendono a propagarsi verticalmente man mano che le ripetizioni del carico proseguono.

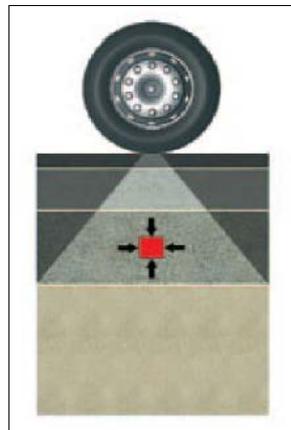
Materiali Legati: Flessione

Materiali Granulari: carico-dipendente

Fig.1.17 - Comportamento Sotto Carico Veicolare di Materiali Legati e Granulari

Le deformazioni che si creano nel materiale naturale e le incrinature da fatica tipiche del materiale legato sono entrambe correlate al numero di ripetizioni del carico. Questo consente di determinare la vita funzionale di una pavimentazione in termini di numero di volte che questa può essere «caricata» prima di essere soggetta al cedimento; stiamo parlando di quella che viene denominata «Capacità Strutturale» della pavimentazione.

Sottofondo della Pavimentazione

Il terreno naturale d'impianto della struttura della pavimentazione può essere sia materiale in situ (sterro) o «importato» (riporto). Le caratteristiche di resistenza di questo materiale determinano il tipo di struttura della pavimentazione in grado di distribuire il carico impartito alla superficie in modo tale che questo venga sorretto senza provocare deformazioni permanenti. I metodi di progettazione delle pavimentazioni stradali utilizzano generalmente, quale input, la resistenza e la rigidezza del sottofondo e mirano a realizzare una struttura avente una resistenza tale da proteggere il sottofondo. Il metodo empirico di progettazione basato sull'Indice di Portanza Californiano (CBR = California Bearing Ratio) è uno dei più vecchi sistemi di progettazione delle pavimentazioni stradali per il quale basta l'indice CBR per stabilire i requisiti della pavimentazione. In generale, strutture della pavimentazione ad elevato spessore sono necessarie per proteggere il sottofondo di qualità inferiore e tale spessore viene di frequente ottenuto aggiungendo degli strati di «sottofondo selezionato».

1.3.2 – Deterioramento delle pavimentazioni stradali

Le pavimentazioni stradali si logorano per diverse ragioni; le due cause più importanti sono rappresentate dagli effetti ambientali e dal carico del traffico. Il deterioramento viene normalmente misurato in modo indiretto mediante la valutazione della transitabilità senza però tralasciare aspetti visibili quali la profondità del solco e la fessurazione del manto. La Figura 1.18 mostra come queste tre caratteristiche siano tipicamente correlate al trascorrere del tempo e all'effetto cumulativo del carico del traffico.

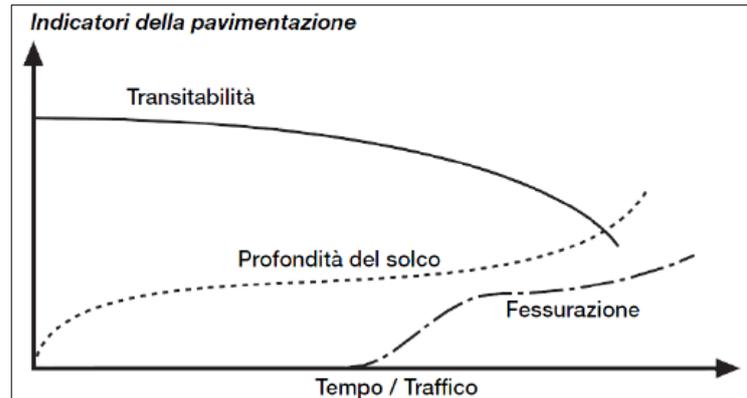



Fig.1.18 - Indicatori della Pavimentazione

Il graduale deterioramento delle pavimentazioni è provocato da:

Fattori ambientali, responsabili della maggior parte delle fessure che si formano sul manto. La principale causa di questo fenomeno sono i raggi ultravioletti del sole che provocano, in modo continuo, un lento indurimento del bitume; questo a sua volta causa una riduzione dell'elasticità che determina la formazione di fessure nel momento in cui il manto si contrae in seguito al raffreddamento. Una volta che il manto ha perso la propria capacità strutturale a causa delle suddette fessure, la pavimentazione tende a deteriorarsi ad un ritmo sempre crescente per effetto della penetrazione di acqua.

Gli effetti del carico impartito dal traffico, responsabili dello sviluppo di solchi e di incrinature che si formano all'interno della struttura della pavimentazione. Ogni veicolo in transito provoca una lieve deformazione temporanea alla struttura della pavimentazione. La deformazione indotta da un veicolo leggero è talmente piccola da essere irrilevante mentre i veicoli ad elevato carico provocano deformazioni relativamente ampie. Il passaggio di numerosi automezzi ha un effetto cumulativo che genera gradualmente deformazioni permanenti e/o incrinature da fatica. Assali sovraccaricati causano un numero sproporzionato di danni alla struttura della pavimentazione, accelerando così il fenomeno di deterioramento.

Quest'ultimo è causato da due diversi meccanismi che agiscono all'interno della struttura della pavimentazione, vale a dire:

- Una deformazione permanente provocata dall'addensamento, ove le ripetute sollecitazioni di carico fanno sì che i singoli granuli all'interno dello strato della pavimentazione si avvicinino, causando una riduzione del numero di

vuoti. Nel materiale granulare, questa perdita di vuoti comporta un aumento della resistenza (quanto più un materiale è denso e tanto più questo è resistente) ma, nel caso dell'asfalto, si verifica l'esatto contrario. Una riduzione della quantità di vuoti nell'asfalto non solo provoca solchi nelle aree di impronta ma fa sì che il bitume inizi ad agire come un fluido per cui i carichi delle ruote generano pressioni idrauliche. Questo fenomeno provoca una spinta lungo i bordi della carreggiata;

- Incrinature da fatica dei materiali legati. Queste si sviluppano nella parte inferiore dello strato ove la deformazione da trazione provocata dai carichi delle ruote è al suo massimo livello. Dette incrinature si propagano poi alla superficie. Le deformazioni permanenti del materiale sottostante aggravano questa condizione aumentando di fatto l'entità della deformazione da trazione esercitata dai carichi delle ruote. Una volta che l'incrinatura si insinua attraverso il manto protettivo, l'acqua penetra nella struttura sottostante della pavimentazione. Come descritto in precedenza, l'effetto di ammorbidimento dell'acqua comporta una riduzione della resistenza che a sua volta provoca un aumento del grado di deterioramento in caso di ripetuti carichi per ruota.

Inoltre, l'acqua in un materiale saturo trasmette prevalentemente carichi ruota verticali sotto forma di pressioni che erodono rapidamente la struttura del materiale granulare e provocano la separazione del bitume dall'aggregato di asfalto. In queste condizioni le frazioni fini del materiale della pavimentazione vengono espulse verso l'altro attraverso le incrinature (noto come «effetto pompa»), la qual cosa comporta lo sviluppo di vuoti di ampie dimensioni all'interno della pavimentazione. La formazione di buche e il rapido deterioramento della pavimentazione sono l'immediata conseguenza del logorio della sede stradale. La Figura 1.19 indica tre delle più comuni forme di deterioramento della pavimentazione.

Solchi limitati agli strati di asfalto

Incrinature da fatica della base di asfalto con penetrazione di acqua e conseguente perdita di fini dalla fondazione granulare

Deformazione del sottofondo che genera incrinature negli strati sovrastanti, provocando la penetrazione d'acqua e la conseguente perdita di fini dalla fondazione granulare

Manto di Asfalto
Base di Asfalto
Fondazione Granulare
Sottofondo

Fig.1. 19 - Forme di Deterioramento della Pavimentazione Stradale

In quei casi in cui le temperature scendono al di sotto di 4°C, l'eventuale acqua, presente nella pavimentazione, si espande creando pressioni idrauliche, persino in assenza dei carichi delle ruote. La deformazione da gelo causata da ripetuti cicli gelo/disgelo rappresentano l'aspetto più grave per una pavimentazione caratterizzata da fessure; ne consegue infatti il disfacimento. Nelle aree desertiche secche, le fessure del manto stradale provocano un altro tipo di problema. Di notte, quando le temperature sono relativamente basse (spesso sotto zero) il manto stradale si contrae aumentando le dimensioni delle fessure e comportandosi come un rifugio per la sabbia battuta dal vento. Durante il giorno, quando le temperature salgono, la superficie non riesce ad espandersi a causa della sabbia intrappolata all'interno della fessura, il che fa sì che grosse forze orizzontali provochino una rottura ai lati della fessura. Queste forze possono poi portare ad un innalzamento del manto rispetto alla struttura della pavimentazione in prossimità delle fessure influendo sulla qualità, decisamente scadente, della transitabilità. Un'ulteriore causa della fessurazione superficiale, in modo particolare dei manti sottili di asfalto, è legata alla mancanza di traffico. L'azione di «impastamento» del traffico mantiene «vivo» il bitume. L'ossidazione e il conseguente indurimento di tale materiale provoca la formazione di fessure termiche a livello della superficie bitumata. La continua esposizione a sollecitazioni del bitume provoca una tensione tale da chiudere queste fessure non appena si formano, evitandone così la propagazione.

1.3.3 Manutenzione e risanamento delle pavimentazioni stradali

Gli interventi di manutenzione della pavimentazione solitamente hanno come obiettivo quello di evitare l'infiltrazione d'acqua negli strati più profondi. A tale scopo, è necessario garantire l'impermeabilizzazione del manto nel tempo e realizzare e mantenere efficaci le opere di drenaggio al fine di impedire che l'acqua non si depositi lungo il ciglio stradale.

L'acqua penetra normalmente nella struttura superiore della pavimentazione attraverso le fessure del manto stradale su cui spesso si deposita. Le fessure, quindi, devono essere sigillate non appena compaiono e i margini della strada devono essere rifilati per consentire lo scolo dell'acqua. Se affrontati con un certo anticipo, gli effetti dell'invecchiamento possono essere trattati efficacemente mediante la nebulizzazione di emulsione bituminosa. In caso di condizioni più gravi occorre applicare un impermeabilizzante a scagliette, qualora il volume del traffico sia ridotto, oppure un sottile rivestimento tradizionale di asfalto miscelato a caldo. I suddetti provvedimenti, che mirano a conservare la flessibilità e la durata del manto stradale, risolvono in effetti soltanto il deterioramento dovuto alle condizioni ambientali.

Le deformazioni e le incrinature da fatica causate dal carico del traffico non possono essere trattate in modo efficace mediante interventi superficiali di manutenzione; esse richiedono infatti interventi di risanamento.

L'usura della pavimentazione, solitamente, è un processo relativamente lento. Gli indicatori di deterioramento della pavimentazione di cui al paragrafo precedente possono essere utilizzati per monitorare il ritmo del deterioramento. Gli enti competenti impiegano spesso un sistema di database, noto come Sistema di Gestione della Pavimentazione (PMS = Pavement Management System) per controllare continuamente la transitabilità di tutte le pavimentazioni stradali della loro rete viaria, concentrandosi su quelle che richiedono maggiore attenzione.

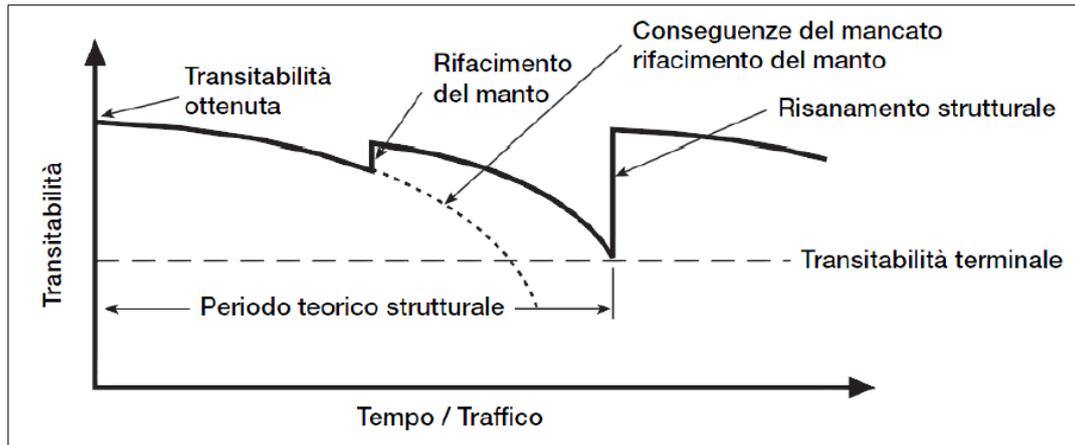



Fig.1.20 - Pianificazione della Manutenzione e Riabilitazione mediante il Monitoraggio delle Condizioni di Guida

La Figura 1.20 riporta un grafico di PMS che mostra l'efficacia di interventi di manutenzione e di risanamento atti a mantenere alti livelli di transitabilità dell'opera o quantomeno accettabili. Essi sono infatti indice del tasso di deterioramento della sovrastruttura: peggiori livelli delle condizioni d'uso della strada, comportano maggiore rapidità di deterioramento. Al peggiorare delle condizioni, crescono l'entità e i costi degli interventi di ripristino.

Nella figura sopra riportata, viene sottolineata l'importanza di agire in modo tempestivo allo scopo di garantire le migliori condizioni possibili di transitabilità.

Il ritmo di deterioramento come detto, è un fattore legato alla transitabilità; peggiore è la transitabilità e più rapido sarà il ritmo di deterioramento. Man mano che la qualità della transitabilità si riduce, occorreranno rimedi di più ampia portata con un conseguente aumento dei costi. La decisione circa il tipo di intervento a cui ricorrere per migliorare la pavimentazione stradale o semplicemente per garantirne le condizioni iniziali di transitabilità è spesso dettata da considerazioni di natura economica, con vincoli legati al budget. Provvedimenti di conservazione a breve termine possono essere estremamente redditizi. Il ripristino della pavimentazione viene talvolta differito fino a quando non potrà essere associato ad interventi volti a migliorare la geometria stradale.

Ogni decisione relativa a procedure di risanamento va comunque presa, nell'ambito del contesto dell'intera rete viaria. Del resto, non fare alcunché e lasciare che la pavimentazione si deteriori ulteriormente è generalmente la decisione peggiore a causa del tasso esponenziale del grado di deterioramento col trascorrere del tempo.

1.4 - Il fresato o RAP

1.4.1 - Introduzione

Il fresato nell’ottica del risanamento delle pavimentazioni e al contempo dell’applicazione del concetto di sostenibilità si pone altresì come una valida risposta a queste due necessità.

Col termine fresato, o più in generale di Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), si indica il materiale di rifiuto ottenuto dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera quindi un rifiuto da Costruzione e Demolizione. Tale rimozione può avvenire per fresatura (da cui appunto il termine fresato) del c.b. tramite fresa autocarrata o per demolizione (scarifica) degli strati bituminosi per mezzo di opportuni macchinari (escavatore, ripper, scraper, altri) che producono blocchi a lastre irregolari di c.b. demolito da frantumarsi, se necessario, in seguito. In termini pratici secondo il SITEB, il cosiddetto *“fresato bituminoso”* è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da una elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato. Entrando nel merito delle demolizioni, nel caso in cui sia richiesta una lieve scarifica della pavimentazione, si opera con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 millimetri per singola passata.

Fig.1. 21 – Una tipologia di scarificatrice cingolata

Volendo rimuovere completamente la sovrastruttura si ricorre invece a bulldozer o a sistemi pneumatici. A demolizione avvenuta, per il fresato ottenuto, vi sono due possibilità:

- il trasporto in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio;
- la polverizzazione in sito e la successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi.

Analizzando accuratamente le caratteristiche del materiale di risulta dalla demolizione, si riconosce come questo sia un aggregato vero e proprio con una sua curva granulometrica, generalmente caratterizzata da piccole percentuali di materiali fini, che contiene bitume invecchiato. In alcuni casi il vecchio legante può essere catrame, che provenendo dal carbone, contiene un'alta percentuale d'elementi cancerogeni (PAHs) che ne impediscono il suo reimpiego nella realizzazione di nuove strade attraverso la tecnica del riciclaggio. Nella tecnica stradale il riciclaggio viene definito come: il recupero ed il riutilizzo delle materie prodotte dalla dismissione degli strati di conglomerato bituminoso ammalorati (RAP) per il rifacimento dei diversi strati, superficiali e portanti, costituenti le pavimentazioni stradali. Preliminarmente è necessario il riconoscimento dei requisiti qualitativi del RAP, da valutare all'interno dell'attività di laboratorio e sotto i seguenti aspetti:

- Percentuale di legante;
- Anzianità del legante;
- Tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- Curva granulometrica.

Le caratteristiche del legante originario sono importanti tanto per assicurarsi che questo sia in grado di recuperare, nella rigenerazione, tutte le caratteristiche perse per invecchiamento ed ossidazione, quanto per assicurarsi che non sia eccessivamente "duro" (è richiesto un bitume che restituisce valori alle prove C.N.R. di penetrazione a 25°C maggiori di 15 dmm e valori del punto di rammollimento minori a 75°C). Per quanto riguarda gli aggregati, che costituiscono l'elemento principale del fresato, questi possono essere calcarei o silicei. E' importante stabilire la loro natura per effettuare scelte idonee al momento della selezione e della formulazione dell'emulsione bituminosa. A tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità col legante, l'opportuna lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale.

1.4.2 – Caratteristiche prestazionali del RAP

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del R.A.P. sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione che espletava il conglomerato d'origine (strato di base, usura, binder…). Il compito del singolo strato di conglomerato costituente la pavimentazione induce sostanziali differenze nella natura, qualità e pezzatura degli aggregati. In uno strato d'usura, per conferire un'aderenza accettabile, gli inerti devono essere altamente resistenti all'abrasione ed al levigamento. Tali qualità non sono, invece, richieste per confezionare uno strato di binder avente solo una funzione di collegamento.

Il conglomerato bituminoso proveniente dalle vecchie pavimentazioni esauste viene trattato frantumandolo o fresandolo; la prima tecnica comporta una minore percentuale di materiale fino nella miscela di risulta rispetto alla seconda.

La macinatura e la frantumazione del R.A.P. provocano il naturale affinamento della pezzatura degli aggregati in esso contenuti rispetto alla miscela d'origine. Questa diminuzione di pezzatura è imputabile, principalmente, alla macinatura.

In ogni caso, la distribuzione dimensionale delle particelle del R.A.P. macinato può variare molto in funzione dei sistemi usati nella sua produzione e trattamento ed, inoltre, dalla natura degli aggregati in esso contenuti.

Con il trattamento in centrale o in sito il R.A.P. prodotto può essere frantumato, o macinato, in particelle di dimensioni minori di 38 mm sempre che, la massima dimensione degli aggregati, non superi i 63 mm.
L'intervallo di distribuzione delle particelle che risultano normalmente dai processi di frantumazione o macinatura del R.A.P. viene riportato nella Tabella 1.7

Dimensione Setacci	% di Passante dopo Fresatura
38.1 mm (1.5 in)	100
25.0 mm (1.0 in)	95-100
19.0 mm (3/4 in)	84-100
12.5 mm (1/2 in)	70-100
9.5 mm (3/8 in)	58-95
4.75 mm (N°4)	38-75
2.36 mm(N°8)	25-60
1.18 mm (N°16)	17-40
0.60 mm (N°30)	10-35[a]
0.30 mm (N°50)	5-25[b]
0.15 mm (N°100)	3-20[c]
0.075 mm (N°200)	2-15[d]

a. generalmente meno del 30 % c. generalmente meno del 15%
b. generalmente meno del 20 % d. generalmente meno del 10%

Tab.1.7 - Composizione Granulare del RAP

Nonostante la carenza in letteratura di dati a disposizione riguardanti il R.A.P. si può affermare che, con una buon'approssimazione, la densità di volume del R.A.P. frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quello degli aggregati vergini e si colloca tra 1940 e 2300 kg/m^3. Generalmente l'umidità naturale del materiale si aggira intorno al 5 % ed un'eventuale esposizione alla pioggia può provocare un incremento fino a valori compresi tra il 7 e l'8 %. Nell'ottica del risparmio energetico la permanenza di R.A.P. nelle riserve dovrà essere minima. Il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni esistenti presenta, usualmente, un contenuto di legante tra il 4.5 ed il 6 %, ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e in esercizio. Estraendo ed analizzandolo il bitume dal R.A.P. questo evidenzia una bassa penetrazione ed un alto valore di viscosità che variano con la durata in servizio della pavimentazione originaria. I valori di penetrazione a 25° C si collocano, spesso, nell'intervallo compreso tra i 10 ed gli 80 dmm mentre la viscosità, a 60°/C, ha valori che oscillano da un minimo di 2000 ad un massimo di 50000 Poises e, quanto più è esteso il periodo di servizio, tanto più la viscosità cresce. La Tabella 1. 8 presenta in modo sommario, i valori tipici che possono caratterizzare le proprietà fisiche del R.A.P. oltre alla gradazione degli aggregati già mostrata.

Tipo di Proprietà	Proprietà	Tipico Intervallo di Valori
Proprietà Fisiche	Peso Specifico	1940-2300 kg/m3
	Contenuto di Umidità	Normale: > 5% Massimo: 7-8%
	Contenuto di Bitume	Normale: 4.5-6% Massimo: 3-7%
	Penetrazione del Bitume	10-80 a 25°C (77°F)
	Viscosità Assoluta	4000-25000 poise a 60°C (140°F)
Proprietà Meccaniche	Peso Specifico del Compattato (asciutto)	1600-2000 kg/m3
	California Bearing Ratio (CBR) (dopo una settimana)	100% RAP: 20-25% 40% RAP, 60% vergine: ≥ 150%

Tab.1. 8 - Proprietà Fisiche e Meccaniche del R.A.P

1.5 –Pneumatici

1.5.1 – Composizione e caratteristiche

Gli pneumatici equipaggiano la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo stradale e costituiscono un problema significativo nel momento in cui raggiungono il termine della loro vita utile, dato il peso relativo che il trasporto su strada ricopre nel sistema globale dei trasporti.

Fig.1.22 – Pneumatici fuori uso

Lo pneumatico fuori uso è un rifiuto speciale non pericoloso, identificato nell’elenco europeo dei rifiuti con il codice CER 16 01 03, ovvero appartenente alla categoria di

"rifiuti prodotti dallo smantellamento di veicoli fuori uso e dalla manutenzione di veicoli".

È necessaria una distinzione precisa tra pneumatico fuori uso e pneumatico usato, in quanto il primo (PFU) è lo pneumatico non più utilizzabile che non può essere sottoposto a ricostruzione; viceversa il secondo (PU) ha una struttura integra che ne consente il reimpiego tal quale o previa ricostruzione. La distinzione tra PFU e PU è netta e anche sottolineata dal DM del 09/01/2003 che ha espunto gli pneumatici ricostruibili dalla definizione del CER 16 01 03, attribuendo lo status di non-rifiuto allo pneumatico usato.

Essi sono costituiti da una struttura toroidale elastica di gomma naturale o sintetica e possono essere di due tipi:

- I tube type: sono pneumatici con camera d'aria che racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno; la copertura è costituita da gomma sintetica, essenziale nel trasmettere gli attriti che si generano con il movimento, e tele di fibra o di metallo;
- I tubeless sono pneumatici che posseggono la funzione di camera d'aria e non ne richiedono l'utilizzo, mentre la copertura è identica a quella dei tube type. Attualmente tutte le autovetture vengono prodotte con pneumatici tubeless, mentre gli autobus e gli autocarri utilizzano entrambi i modelli.

La struttura dello pneumatico, rappresentata nella Figura 1.23 (Struttura dello Pneumatico), è costituita dal battistrada e dalla carcassa:

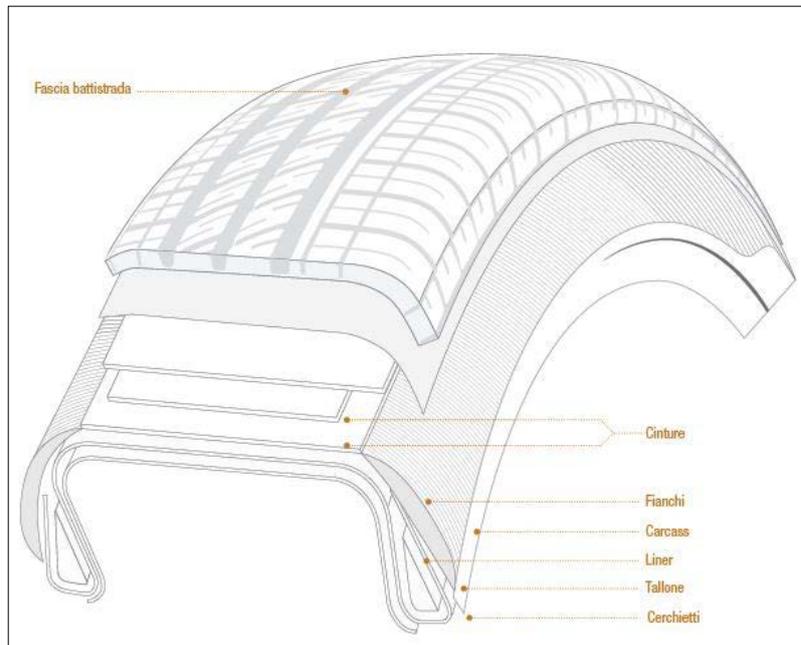



Fig.1. 23 – Struttura pneumatico

Il battistrada - è la parte del pneumatico essenziale per l'aderenza con il terreno con il quale è a contatto e consiste in un anello di gomma compatta che avvolge la carcassa. Fondamentale poi è la mescola, che deve garantire un giusto compromesso tra la resistenza all'usura e una buona aderenza in tutte le condizioni di esercizio. Le mescole tradizionali sono costituite da composti elastomeri (gomma naturale, SBR, copolimeri butadiene-stirene, polibutadiene, polisoprene di sintesi, gomma butilica) in dosi variabili e da additivanti (quali il nerofumo, gli oli, i plastificanti e lo zolfo) che permettono di esaltare determinate caratteristiche.

La carcassa - è la parte strutturale dello pneumatico su cui è vulcanizzato il battistrada. Ottenuta dalla sovrapposizione di tele incrociate di materiale tessile o sintetico impregnate di gomma ed eventualmente rinforzate con fili metallici, essa termina con due robusti talloni che contengono i cerchietti, formati da anelli di fune metallica cha hanno la funzione di mantenere la carcassa ben aderente al cerchio. Le varie tele sono fra loro unite con procedimento di vulcanizzazione che le rende una struttura unitaria. La carcassa di uno pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece negli pneumatici per autocarri che invece inglobano una percentuale maggiore di acciaio. La parte laterale della carcassa viene chiamata spalla e assolve due obbiettivi: la resistenza alla flessibilità in senso

verticale che serve a minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo e la rigidezza orizzontale che serve a trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione.
Volendo è possibile analizzare quelle che sono le caratteristiche geometriche che ne influenzano il comportamento in strada:

- **Profilo del pneumatico**: studiato a seconda delle esigenze a cui deve rispondere e al mezzo su cui va applicato, si può dividere in due tipi:
    - *normale*, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore guidabilità. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un unione tra spalla e battistrada arrotondato
    - *sportivo*, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore tenuta. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un’unione netta tra spalla e battistrada, in modo da massimizzare l’impronta a terra, anche se come inconveniente l’inserimento in curva risulta meno lineare.
- **La larghezza del battistrada**: è un parametro che influisce in vari modi a seconda della tipologia di pneumatico:
    - *motociclistico*, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la sua capacità di tenuta, ma si penalizza così la tenuta su fondi bagnati;
    - *automobilistico*, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la capacità di tenuta ma si penalizza la velocità di sterzata e di cambio direzione.
- **L’altezza spalla**: maggiore sarà l’altezza della spalla e maggiore sarà la distanza tra il manto stradale e il cerchione. Questa caratteristica permette una maggiore deformazione del profilo del pneumatico, migliorando l’assorbimento di fondi irregolari, ma sfavorevolmente riduce la propria reattività su fondi duri e regolari quali le strade.
- **Circonferenza della ruota**: maggiore sarà tale valore e minore sarà l’effetto delle irregolarità del terreno e si avrà un passaggio più morbido da un livello all’altro.

Oltre le caratteristiche geometriche occorre osservare quali sono le proprietà fisiche del pneumatico che si distinguono in:

- **Pressione del pneumatico:** maggiore sarà la pressione e maggiore sarà la durezza del pneumatico, questo valore deve essere regolato in base al peso del veicolo, al tipo di strada da percorrere e al pneumatico utilizzato
- **Aderenza dei pneumatici:** l'aderenza dei pneumatici non è definita dalla larghezza dello stesso ma dal coefficiente d'aderenza del pneumatico, che viene definito in funzione della mescola.

La composizione degli pneumatici da autovettura è diversa da quella degli pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni tra gomma naturale e sintetica, nerofumo e silice e gli altri ingredienti usati nelle mescole. Nella Figura 1.24 sono riassunte le composizioni medie degli pneumatici di autoveicoli ed autocarri.

Ciascun ingrediente della mescola contribuisce a dare allo pneumatico delle specifiche caratteristiche, con lo scopo di incrementarne la vita utile. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche di robustezza ed elasticità occorre sottoporla a processi di vulcanizzazione, che diano origine a legami tra le molecole che la compongono. Tale processo ha l'ulteriore conseguenza di rendere la miscela estremamente resistente all'azione di microrganismi, che impiegano più di cento anni prima di riuscire a distruggere i suddetti legami, rendendo impossibile lo smaltimento degli pneumatici nelle discariche.

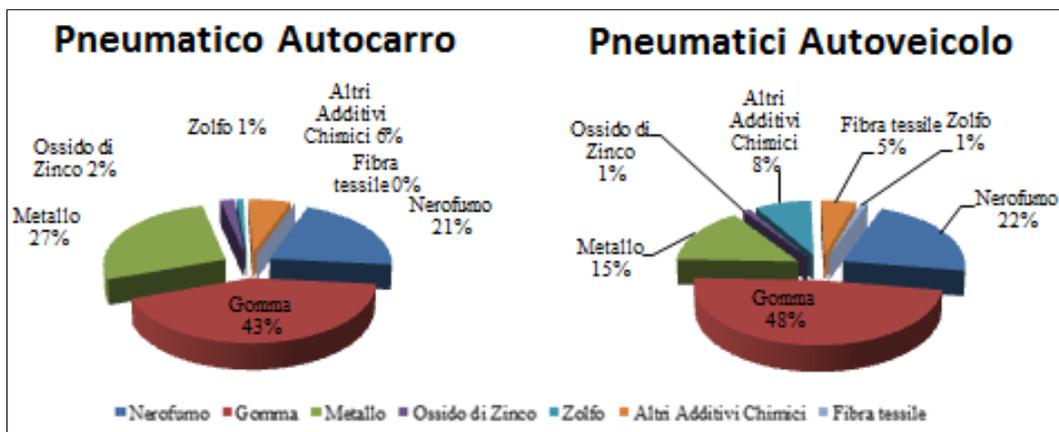



Fig.1.24 – Composizione tipica degli pneumatici per autocarro e autoveicolo

1.5.2 – Pneumatici ed Ambiente

Il Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, n.82, recante il "Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso (PFU)" pubblicato in gazzetta ufficiale n.131 del 8 giugno 2011, introduce un'importante novità ed evidenzia l'importanza del concetto di tutela dell'ambiente, basata sulla raccolta e sul recupero dei PFU.

La definizione dei PFU, pubblicata in Gazzetta Ufficiale, è la seguente: *"gli pneumatici*, *rimossi dal loro impiego a qualunque punto della loro vita*, *dei quali i detentori (ndr persona fisica o giuridica) si disfi*, *abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi e che non sono fatti oggetto di ricostruzione o di successivo riutilizzo"*. Sono esclusi dall'applicazione del decreto i pneumatici per bicicletta, la camera d'aria, i relativi protettori (flap), le guarnizioni in gomma, i pneumatici per aeroplani, le gomme solide e cingoli gommati. Il produttore o importatore di pneumatici è la persona fisica o giuridica che immette per la prima volta sul mercato pneumatici da impiegare come ricambio. Ottimizzare il recupero dei PFU, prevenire la formazione e proteggere l'ambiente sono gli obiettivi fondamentali del decreto.

La legge si basa sul principio di responsabilità dei produttori e degli importatori di pneumatici, i quali saranno tenuti a raccogliere e gestire PFU, di qualsiasi marca, ma in misura almeno equivalente alla quantità di pneumatici che hanno immesso nel mercato nazionale, da soli o in forma associata. L'analisi del mercato dei PFU e le loro modalità di recupero verranno affrontate nel capitolo successivo.

Capitolo 2 – Il quadro normativo

2.1 – Introduzione

Nel capitolo vengono riportati i riferimenti legislativi a livello comunitario, nazionale e locale riguardanti le attività coinvolte nel processo di riciclaggio dei rifiuti, per la loro utilizzazione nella costruzione di opere stradali, accompagnati dai principali documenti ausiliari, quali sentenze e disposizioni applicative a completamento del suddetto quadro legislativo.

2.2 – Leggi Nazionali e Comunitarie UE

Il quadro legislativo comunitario e nazionale si è molto evoluto negli ultimi dieci anni, innalzando le problematiche del riciclaggio dei rifiuti al rango di fattore fondamentale per il raggiungimento dell’obiettivo di sostenibilità dello sviluppo. Del Programma quadro di Azione Ambientale dell’Unione Europea può darsi una descrizione sintetica utilizzando la parola d’ordine delle 4R, ovvero le quattro strategie operative che riguardano:

- **R**iduzione della quantità di rifiuti prodotti;
- **R**iutilizzo dei prodotti;
- **R**iciclaggio ed il recupero dei materiali;
- **R**ecupero di energia.

Nel paragrafo che seguente sono delineate le principali Direttive della Comunità e dell’Unione Europea destinate a dare esecuzione alle prime tre delle dette quattro strategie operative, che hanno diretta attinenza con il tema del recupero di materiale nelle costruzioni stradali.

2.2.1 – Unione Europea: Direttive, Normative e Attività delle Commissioni

La Direttiva 99/31/CE costituisce la direttiva di riferimento per le discariche di rifiuti e mira a prevenire o a ridurre le ripercussioni negative sull’ambiente. La proposta specifica le diverse categorie di rifiuti (rifiuti urbani, pericolosi, non pericolosi e inerti) e si applica a tutte le discariche definite come un’area di smaltimento dei rifiuti adibita al deposito degli stessi sulla o nella terra. Essa

classifica le discariche in tre categorie: discariche per rifiuti pericolosi; discariche per rifiuti non pericolosi; discariche per rifiuti inerti.

Sono invece esclusi dall'ambito di applicazione della direttiva:

- l'uso di rifiuti inerti in lavori di accrescimento e ricostituzione nelle discariche;
- il deposito di terra non inquinata o di rifiuti inerti non pericolosi, ricavati dalla prospezione ed estrazione, dal trattamento e dallo stoccaggio di minerali nonché dallo sfruttamento di cave;

Viene definita una procedura uniforme di ammissione dei rifiuti allo scopo di evitare ogni pericolo e vengono individuati i rifiuti che non sono ammessi in una discarica.

La Direttiva 75/442/CEE del 15 luglio 1975, direttiva quadro sui rifiuti, modificata dai seguenti provvedimenti:

- direttiva 91/156/CEE del Consiglio, del 18 marzo 1991;
- direttiva 91/692/CEE del Consiglio, del 23 dicembre 1991;
- decisione 96/350/CE della Commissione, del 24 maggio 1996;
- direttiva 96/59/CE del Consiglio, del 16 settembre 1996,

mira ad istituire una gestione coordinata dei rifiuti nella Comunità al fine di limitarne la produzione.

La Decisione 2000/532/CE della Commissione, del 3 maggio 2000, (modificata dalle decisioni 2001/118/CE, 2001/119/CE e 2001/573/CE) sostituisce la decisione 94/3/CE (che istituisce un elenco di rifiuti conformemente all'articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti) e la decisione 94/904/CE del Consiglio (che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti pericolosi); essa unifica a livello comunitario l'elenco dei rifiuti pericolosi istituito dalla decisione 94/904/CE e l'elenco dei rifiuti istituito dalla decisione 94/3/CE, abrogando le due decisioni a partire dal 1° gennaio 2002.

2.2.2 –Decreto legislativo 5 Febbraio 97' n. 22

Grazie al recepimento delle Direttive Europee 91/156/CEE, 91/689 CEE E 94/62/CEE, relative rispettivamente a rifiuti, rifiuti pericolosi e rifiuti da imballaggio, si è pian piano introdotto nel quadro legislativo italiano una visione del rifiuto non più termine della catena dei consumi, ma come punto di partenza per cicli produttivi innovativi, in grado di sfruttare le potenzialità residue di ciascun elemento residuato.

Il principale strumento legislativo del settore è il decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) di attuazione delle direttive suddette, sul quale si basano tutte le attività legislative successive. L'art. 4 del decreto riveste particolare importanza ai fini del trattamento e del reimpiego dei rifiuti da Costruzione e Demolizione; in esso viene stabilito che le autorità competenti devono favorire ed incentivare le attività di recupero e riciclaggio dei rifiuti, anche attraverso la stipula di accordi con i soggetti economici interessati alle suddette attività, con la possibilità di stabilire agevolazioni in materia di adempimenti amministrativi ed il ricorso a strumenti economici, secondo le modalità specificate al successivo art.25. Al Capo IV del decreto viene invece definito l'iter da seguire per ottenere l'autorizzazione alla realizzazione ed all'esercizio di impianti di smaltimento e recupero dei rifiuti nonché le autorizzazioni necessarie per la realizzazione di impianti di ricerca e sperimentazione. Negli art. 31 e 33 sono definite le procedure semplificate per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti.

2.2.3 – Decreto Ministeriale 5 Febbraio 98', con modifiche introdotte dal D.M. 9 Gennaio 03', dal D.M. 27 Luglio 04' e dal D.M 5 Aprile 06', n. 186

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 5/02/98 contiene l'elenco delle attività di recupero che ai sensi degli artt. 31 e 33 del D.Lvo 22/97 possono essere autorizzate secondo procedure semplificate. Queste ultime, a differenza di quelle di tipo ordinario, hanno un iter più veloce sia in termini di durata del procedimento autorizzativo (90 giorni e non i 150 giorni previsti nel caso di procedura ordinaria) sia in termini di documentazione da presentare. La motivazione di questa diversità sta nel fatto che i procedimenti elencati nell'allegato 1 sub-allegato 2 del predetto decreto sono ritenuti dal legislatore sistemi di recupero dei rifiuti consolidati, di cui, cioè, si conosce il grado di efficacia e di sicurezza sotto il profilo ambientale.

L’art. 3 del D.M. 5/02/98, con riferimento al recupero di materiali individuati all’allegato 1, stabilisce che le attività ed i procedimenti tesi al riciclaggio od al recupero di tali materiali devono garantire l’ottenimento di materie prime o materie prime secondarie con caratteristiche merceologiche conformi alla normativa di settore e nelle forme usualmente commercializzate. I rifiuti provenienti dal recupero e dal riciclaggio dei rifiuti non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie derivanti dall’utilizzo di materie prime vergini.

Il Decreto del Ministro dell’Ambiente del 5/04/06, n. 186, emanato per adeguare "sollecitamente e compiutamente" il D.M. 5/02/98 alle indicazioni fornite dalla Corte Europea di Giustizia nella sentenza 7 ottobre 2004, causa C-103/02, ha introdotto numerose variazioni nel testo dell’articolato del D.M. 5/02/98. Quelle di maggiore interesse per il settore stradale riguardano le quantità ammesse a recupero in procedura semplificata, le procedure di campionamento (UNI 10802), il test di cessione.

Nell’allegato 1, sub-allegato 1, per i conglomerati bituminosi si prevede, al punto 7.6, quanto segue:

> 7.6 **Tipologia**: conglomerato bituminoso, frammenti di piattelli per il tiro al volo[170302][200301].
>
> 7.6.1 **Provenienza**: attività di scarifica del manto stradale mediante fresatura a freddo; campi di tiro al volo.
>
> 7.6.2 **Caratteristiche del rifiuto**: rifiuto solido costituito da bitume ed inerti.
>
> 7.6.3 **Attività di recupero**:
>
> a) produzione conglomerato bituminoso "vergine" a caldo e al freddo [R5];
>
> b) realizzazione di rilevati sottofondi stradali (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sulla rifiuto alla quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto) [R5];
>
> c) produzione di materiale per costruzioni stradali e piazzali industriali mediante selezione preventiva (macinazione, vagliatura, separazione dalle frazioni indesiderate, eventuale miscelazione con materia inerte vergine) con eluato conforme al test di cessione secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto [R5].

7.6.4 **Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti**:

a) conglomerato bituminoso nelle forme usualmente commercializzate.

b) Materiali per costruzioni nelle forme usualmente commercializzate.

Inoltre l’allegato 4, sub-allegato 1 riporta le quantità massime di rifiuti non pericolosi di cui all'allegato 1, sub-allegato 1 avviabili a diverse attività di recupero per diverse tipologie di rifiuto. In corrispondenza della voce "Produzione di conglomerati bituminosi", per la tipologia 7.6 suddetta, comprendente quindi i rifiuti individuati dei codici CER [170302][200301], tale quantità massima risulta fissata in 50.230 ton/anno. Infine, sono state riordinate anche le norme riguardanti le terre e rocce da scavo, oggetto di un annoso contenzioso con le autorità comunitarie.

Ad alcune di tali modifiche sarà fatto specifico cenno nei paragrafi seguenti.

2.2.4 Codici CER di interesse per opere stradali

Negli ultimi anni, soprattutto a causa della riduzione della disponibilità di risorse naturali, si è sviluppato un interesse sempre maggiore nella ricerca di materiali alternativi o di recupero da utilizzarsi nel settore delle costruzioni stradali. Si tratta di materiali “ambientalmente sostenibili”, derivanti dal riciclaggio di quelli già presenti sulla pavimentazione o di prodotti di scarto derivanti da lavorazioni industriali e dal recupero di materiali locali di scarsa qualità, il cui impiego risulta di notevole importanza poiché:

- consente la riduzione dello sfruttamento delle cave di prestito e la difesa del regime idrogeologico degli alvei, ottenendo così un migliore utilizzo delle risorse non rinnovabili ed una maggior protezione e salvaguardia dell’ambiente;
- permette una migliore gestione delle discariche, in quanto diminuisce la quantità di materiale da smaltire;
- consente notevoli vantaggi economici derivanti dalla possibilità di ridurre l’uso di inerti pregiati di difficile approvvigionamento e molto costosi;
- permette l’utilizzo di materiali di scarsa qualità disponibili in cantiere riducendo i costi di trasporto dalle cave di prestito e verso i luoghi di rifiuto, con un notevole incremento dell’economia dei procedimenti di costruzione.

A tal fine in questo paragrafo ci si propone di analizzare l'Elenco dei Rifiuti, contenuto nell'Allegato D del D.M. 5/02/98 ed istituito conformemente all'articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE relativa ai rifiuti e all'articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE relativa ai rifiuti pericolosi, con lo scopo di individuare quali di questi possano essere impiegati come materiali alternativi, in sostituzione degli inerti vergini, nel confezionamento degli strati di una sovrastruttura stradale o all'interno del corpo del rilevato.

In particolare verranno approfondite le seguenti tecnologie di recupero:

- R5: Riciclo/recupero di altre sostanze inorganiche;
- R13: Messa in riserva di rifiuti per sottoporli a una delle operazioni di recupero.

La Direttiva del Ministero dell'Ambiente del 9 aprile 2002 "Norme per l'esecuzione della Decisione 2000/532/CE come modificata dalle decisioni 2001/118/CE, 2001/119/CE e 2001/573/CE" introduce delle modifiche al C.E.R. (Catalogo Europeo dei Rifiuti). A tale nuovo Elenco dei rifiuti (CER 2002) faremo esplicito riferimento nelle classificazioni seguenti. Viene inoltre precisato che l'inclusione di un determinato materiale nell'elenco non attribuisce allo stesso la natura di rifiuto di ogni circostanza, in quanto la classificazione del materiale come rifiuto si applica solo se questo risponde alla definizione della direttiva 75/442/CEE. Per la numerazione delle voci contenute nell'elenco sono state applicate le regole previste dalla Direttiva precedentemente richiamata: per i rifiuti rimasti invariati sono stati utilizzati i numeri specificati nella decisione 94/3/CE della Commissione, mentre i codici dei rifiuti che hanno subito modifiche sono stati cancellati e non vengono più citati per evitare confusioni dopo l'adozione del nuovo elenco. La stessa Direttiva prevede inoltre uno specifico allegato con lo schema di trasposizione dei vecchi codici CER nei nuovi codici dell'Elenco dei Rifiuti 2002.

La tabella dei nuovi codici risulta così strutturata: nella prima colonna viene riportato il codice CER del rifiuto impiegabile nella costruzione e manutenzione di opere stradali secondo la nuova classificazione introdotta dalla Direttiva del Ministero dell'Ambiente del 9 aprile 2002 già citata (Codice CER); nella seconda colonna è riportata la descrizione della stessa tipologia di rifiuto secondo quanto riportato nell'allegato A della Direttiva del Ministero dell'Ambiente del 9 aprile

2002 (descrizione); nella terza colonna viene indicata la relativa tipologia di rifiuto (con il richiamo al paragrafo di riferimento) così come classificato nell'allegato 1 – sub-allegato 1 del Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 "Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22" (tipologia); nella quarta ed ultima colonna si riportano le attività di recupero previste per quella determinata tipologia di rifiuto dal Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 di particolare interesse per le opere stradali e viene indicata per ciascuna la classifica così come previsto dall'articolo 6, comma 1, lettera h del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22 e come definita nell'Allegato C della stessa legge (attività di recupero prevista); inoltre per ciascuna attività di recupero viene segnalata tramite un apposito richiamo (*) se esso è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo descritto in allegato 3 del DM 5/2/98.

In relazione al riciclaggio dei rifiuti nei materiali costituenti le pavimentazioni stradali, saranno oggetto di indagine sono alcune tipologie di rifiuto:

- materiali provenienti dalle attività di costruzione e demolizione (di seguito denominati C&D);
- materiali provenienti dalle operazioni di demolizione e/o rifacimento delle pavimentazioni stradali (fresato).

I codici CER che individuano i due rifiuti in questione, entrambi appartenenti prevalentemente alla macrocategoria CER 17, sono riportati nella successiva Tabella 2. 1.

Tipologia	CER	Descrizione
C&D	10	*RIFIUTI PRODOTTI DA PROCESSI TERMICI*
	10 13	rifiuti della fabbricazione di cemento, calce e gesso e manufatti di tali materiali
	10 13 11	rifiuti della produzione di materiali compositi a base di cemento, diversi da quelli di cui alle voci 10 13 09 e 10 13 10
	17	RIFIUTI DELLE OPERAZIONI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE (COMPRESO IL TERRENO PROVENIENTE DA SITI CONTAMINATI)
	17 01	cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche
	17 01 01	cemento
	17 01 02	mattoni
	17 01 03	mattonelle e ceramiche
	17 01 07	miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 17 01 06
	17 08	materiali da costruzione a base di gesso
	17 08 02	materiali da costruzione a base di gesso diversi da quelli di cui alla voce 17 08 01
	17 09	altri rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione
	17 09 04	rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03
Fresato	17 03	miscele bituminose, catrame di carbone e prodotti contenenti catrame
	17 03 01*	Miscele bituminose contenenti catrame di carbone
	17 03 02	miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01

Tab.2. 1 - Categorie di Rifiuti di Interesse per il Riciclaggio nelle Pavimentazioni Stradali

Si osserva che in Italia nel confezionamento di miscele bituminose non è consentito l’impiego di catrame come legante e, pertanto, il fresato risulta di norma individuato dal CER 17 03 02. I rifiuti di cui sopra sono definiti rifiuti speciali in quanto materiali di scarto di attività produttive specifiche.

In Italia, così come in Europa, la diversificazione dei processi produttivi ha determinato una moltiplicazione della tipologia dei rifiuti, con effetti sempre più negativi per l’ambiente.

La possibilità di recuperare, in tutto o in parte, alcune tipologie di rifiuto nell’ambito delle opere stradali sotto forma di materie prime seconde diventa quindi una esigenza primaria.

La suddetta tabella rappresenta un utile riferimento, un punto di partenza per quanti siano coinvolti nel processo di costruzione, gestione, manutenzione e progettazione delle infrastrutture viarie. Anche da una rapida analisi dell'elenco dei codici, è possibile comprendere le grandi potenzialità offerte dalle opere stradali per recuperare nei cicli produttivi una grande varietà di materiali non altrimenti utilizzabili.

2.2.5 – Verifiche di compatibilità ambientale

La prescrizione numero 3 della Direttiva sui Materiali da Costruzione della Comunità Europea (89/106/EEC) richiede di valutare l'aspetto di compatibilità ambientale e di rischio di contaminazione del terreno o dell'acqua da parte degli stessi materiali. Con riferimento alla legislazione nazionale, l'art. 7 del D.Lgs.22/97 classifica i rifiuti (secondo l'origine) in rifiuti urbani e speciali e (secondo le caratteristiche di pericolosità) in rifiuti pericolosi e non pericolosi. Dal 1/1/2002, ai sensi della decisione 2000/532/CE e succ. mod. ed integrazioni, i rifiuti vengono classificati anche in base alla presenza di sostanze pericolose presenti in determinate concentrazioni limite (CL).

I soggetti che intendono realizzare nuovi impianti di smaltimento o di recupero di rifiuti sono tenuti a presentare domanda alla Regione competente per territorio. Anche l'esercizio delle operazioni di smaltimento e di recupero di rifiuti deve essere autorizzato dalla Regione. Esiste l'Albo delle imprese sottoposte ad iscrizione, al quale tutte le imprese che svolgono attività di gestione dei rifiuti (raccolta, trasporto, smaltimento, recupero) devono essere obbligatoriamente iscritte.

Per l'impiego dei rifiuti "Non Pericolosi" di specifico interesse per le opere stradali, esiste la concreta possibilità di avviare le attività di gestione dei rifiuti avendo semplificato l'iter burocratico-amministrativo necessario per ottenere le relative autorizzazioni.

É possibile usufruire di queste procedure per:

- Auto-smaltimento, cioè lo smaltimento di rifiuti non pericolosi effettuati nel luogo di produzione dei rifiuti stessi;
- il recupero dei rifiuti.

Tali attività possono essere intraprese decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio attività alla provincia territorialmente competente.

Nel nostro caso le imprese interessate, per poter mettere in riserva [R13] o recuperare i rifiuti nei propri processi produttivi [R5], potranno accedere alla procedura semplificata mediante comunicazione di inizio attività per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti non pericolosi, ai sensi dell'art. 33 comma 1 del D.Lgs. 22/97 e del D.M. 05/02/98. In termini di "compatibilità ambientale" tali richieste dovranno includere:

- l'autorizzazione alle emissioni in atmosfera dell'impianto, di cui al D.P.R. 203/88;
- l'autorizzazione agli scarichi ai sensi del D.Lgs. 152/99 e s.m.i.;
- i risultati del test di cessione eseguito secondo le procedure previste in All. 3 al D.M. 5/2/98 su campioni ottenuti nella stessa forma fisica prevista nelle condizioni finali d'uso.

Il "test di cessione", così come descritto dal D.M. 5/2/98, prescriveva di valutare la compatibilità ambientale del materiale di prova mediante l'analisi dell'eluizione dei singoli componenti ottenuta mediante immersione del campione solido in acqua deionizzata, rinnovata ad intervalli di tempo prestabiliti, per un totale di durata della prova di 16 giorni. La concentrazione da confrontare con il limite imposto per ciascuna componente era calcolata come somma delle concentrazioni trovate in corrispondenza di tutte le varie fasi di eluizione.

La procedura di prova e la verifica di eco compatibilità sono state oggetto di diverse critiche in quanto:

- anche per i riciclati "migliori" risulta difficile rispettare i limiti imposti dall' All. 3 al D.M. 5/2/98;
- la procedura di prova risulta comunque piuttosto lunga e laboriosa;
- non si considera la ratio del "Decreto Ronchi" per quanto riguarda il recupero dei rifiuti e la verifica di compatibilità ambientale.

Essa non dovrebbe prevedere il semplice rispetto di valori limite stabiliti a priori ma piuttosto verificare che i materiali analizzati non presentino caratteristiche di pericolosità superiori a quelle di analoghe materie prime vergini. In questo modo un

materiale di rifiuto da impiegare per la costruzione del rilevato dovrebbe essere confrontato con una terra di analoghe caratteristiche tecniche.

Parametri	Unita' di misura	Concentrazioni limite
Nitrati	Mg/l NO3	50
Fluoruri	Mg/l F	1,5
Solfati	Mg/l SO4	250
Cloruri	Mg/1 Cl	100
Cianuri	microngrammi /l Cn	50
Bario	Mg/l Ba	1
Rame	Mg/l Cu	0.05
Zinco	Mg/l Zn	3
Berillio	microngrammi /l Be	10
Cobalto	microngrammi/l Co	250
Nichel	microngrammi/l Ni	10
Vanadio	microngrammi/l V	250
Arsenico	microngrammi/l As	50
Cadmio	microngrammi/l Cd	5
Cromo totale	microngrammi/l Cr	50
Piombo	microngrammi/l Pb	50
Selenio	microngrammi/l Se	10
Mercurio	microngrammi/l Hg	1
Amianto	Mg/l	30
COD	Mg/l	30
PH		5,5 < > 12,0

Tab.2.2 - Concentrazioni limite di alcuni elementi e composti chimici

Il D.M. 5/04/06 ha in parte accolto dette critiche, sostituendo il test di cessione “a 16 giorni” con il test riportato nell’appendice A alla norma UNI 10802, secondo la metodica prevista dalla norma: UNI EN 12457-2 [Caratterizzazione dei rifiuti – Lisciviazione - Prova di conformità per la lisciviazione di rifiuti granulari e di fanghi - Parte 2: Prova a singolo stadio, con un rapporto liquido/solido di 10 l/kg, per materiali con particelle di dimensioni minori di 4 mm (con o senza riduzione delle dimensioni)]. Solo nei casi in cui il campione da analizzare presenti una granulometria molto fine, si deve utilizzare, senza procedere alla fase di sedimentazione naturale, una ultracentrifuga (20000 G) per almeno 10 minuti. Dopo tale fase si potrà procedere alla successiva fase di filtrazione secondo quanto riportato al punto 5.2.2 della norma UNI EN 12457-2. I risultati delle determinazioni analitiche devono essere confrontati con i valori limite Tabella 2. 2.

2.2.6 – La marcatura CE

Nella panoramica normativa non si può non ricordare che dal 1 Giugno 2004 in Italia, essendo terminato il periodo transitorio, sono entrate in vigore le norme armonizzate europee attinenti la marcatura CE degli aggregati naturali o riciclati da impiegarsi nel settore delle costruzioni stradali.

La UNI EN 13242 "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade" specifica le proprietà di aggregati ottenuti mediante processo naturale o industriale oppure riciclati per materiali non legati e legati con leganti idraulici, per impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade.

La UNI EN 13285 "Miscele non legate" specifica i requisiti per miscele non legate impiegate per la costruzione e la manutenzione di strade ed altre aree soggette a traffico, essa si applica a miscele non legate di aggregati naturali, artificiali e riciclati con dimensioni superiori comprese tra 8 e 80 mm, e dimensione inferiore pari a 0.

La UNI EN 13043 del gennaio 2004 "Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico" specifica le proprietà di aggregati e filler ottenuti da materiali naturali o riciclati, per impiego in miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade e altre aree soggette a traffico. Tale norma espressamente non si applica all'impiego di conglomerati bituminosi fresati.

Infine la UNI EN 12620 "Aggregati per calcestruzzo" specifica le proprietà degli aggregati e dei filler ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali o riciclati miscelati per essere utilizzati nella confezione di calcestruzzi destinati alle pavimentazioni stradali oltre che alla produzione di prefabbricati. In tutti i casi, indipendentemente dall'impiego finale, si fa esplicito riferimento all'utilizzo di materiali "riciclati".

Le nuove norme europee sugli aggregati occupandosi di aggregati naturali, artificiali e riciclati (esclusi quelli fresati), individuano un campo di applicazione più ampio di quello trattato dalla normativa italiana. Esse stabiliscono inoltre una metodologia di classificazione degli aggregati comune a tutti i paesi della UE in base alla quale è possibile, mediante verifica della costanza del prodotto, apporre il marchio CE.

Dal punto di vista del riciclo l'entrata in vigore della nuova normativa europea segna una svolta, in quanto definisce la classificazione dei materiali da costruzione per opere stradali non più in funzione dell'origine ma in funzione delle prestazioni tecniche che possono offrire. Si determina in questo modo un primo reale passaggio da normative e capitolati puramente prescrizionali a normative con un approccio realmente prestazionale.

Un discorso a parte deve essere fatto relativamente all'utilizzo del fresato proveniente dalla manutenzione di pavimentazioni flessibili esistenti. Nel settembre 2005 con l'approvazione alla votazione finale si è concluso l'iter per la marcatura CE per i conglomerati bituminosi. Queste nuove serie di norme sono state "costruite" partendo dalla funzione e dalle prestazioni che i materiali devono fornire in opera e non sulla base dei materiali costituenti. La serie di norme EN 13108 è stata sviluppata dal Comitato Tecnico CEN/TC 227 "Materiali stradali" e in Italia sono cogenti da marzo 2008.
Tra esse, di sicuro interesse per il mercato italiano sono:

- EN 13108-1: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo;
- EN 13108-5: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 5: Conglomerato bituminoso antisdrucciolo chiuso;
- EN 13108-7: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 7: Conglomerato bituminoso ad elevato tenore di vuoti;
- UNI EN 13108-8: Miscele bituminose – Specifiche del materiale - Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero.

In particolare, questa ultima norma, pur non ricadendo sotto il mandato M/124 della Comunità Europea, fornisce delle importanti indicazioni sulla classificazione del materiale fresato anche in relazione alla norma EN 13043 per un suo riutilizzo nei conglomerati bituminosi di nuova produzione. A seguito dell'entrata in vigore di tale pacchetto normativo la marcatura CE dei conglomerati bituminosi è regolamentata dalla norma "UNI EN 21 - Miscele bituminose - Specifiche del materiale – Parte 21: Controllo di produzione di fabbrica" che prevede quale sistema di attestazione il 2+, finalizzato ad un uso del materiale dove si richiedono elevati requisiti di sicurezza: il produttore per apporre il marchio CE sopra i suoi prodotti non è soggetto solamente ai compiti di controllo, durante la produzione, dei valori dei requisiti rispetto a quelli delle prove iniziali di tipo, ma necessita anche di un certificato rilasciato da un organismo notificato che verifichi il processo produttivo e convalidi quanto

dichiarato dal produttore mediante ispezione iniziale della fabbrica, sorveglianza, valutazione ed approvazione continua del controllo di produzione in fabbrica.

2.2.7 – Testo Unico sull'Ambiente : Decreto Legislativo 3 Aprile 06', n. 152, Recante Norme in Materia Ambientale

La commissione incaricata dal Ministro dell'Ambiente incaricata di predisporre i decreti attuativi della Legge n.308 del 15 dicembre 2004 "Delega al Governo per il riordino, il coordinamento e l'integrazione della legislazione in materia ambientale e misure di diretta applicazione" ha recentemente concluso i suoi lavori. La "relazione illustrativa" che accompagna il testo evidenzia un intento che si traduce nell'adozione di particolari " strategie" quali:

- l'accorpamento delle disposizioni concernenti settori omogenei di disciplina
- l'integrazione dei vari disposti normativi della pluralità di previsioni precedentemente disseminate in testi eterogenei, così riducendo la stratificazione normativa
- l'abrogazione espressa delle disposizioni non più in vigore

Il testo si componeva di 318 articoli (cui vanno aggiunti gli allegati) e, con le modifiche successivamente apportate, risulta così articolato:

- la parte prima contiene disposizioni comuni e principi generali;
- la parte seconda disciplina le procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS), per la valutazione di impatto ambientale (VIA) e per l'autorizzazione integrata ambientale (IPPC);
- la parte terza riguarda la difesa del suolo e la lotta alla desertificazione, la tutela delle acque dall'inquinamento e la gestione delle risorse idriche;
- la parte quarta tratta la gestione di rifiuti e la bonifica dei siti contaminati;
- la parte sesta dispone sulla tutela risarcitoria contro i danni all'ambiente.

Le finalità del decreto sono indicate nell'art. 21 nella "promozione dei livelli di qualità della vita umana, da realizzarsi attraverso la salvaguardia ed il miglioramento delle condizioni dell'ambiente e l'utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali". Il principio dell'azione ambientale è contemplato dall'articolo 3 ter, ove è stabilito che la tutela dell'ambiente, degli ecosistemi naturali e del patrimonio culturale deve essere garantita, da tutti gli enti pubblici e privati e dalle persone

fisiche e giuridiche pubbliche o private, mediante un'adeguata azione informata ai principi che, ai sensi dell'articolo 174 2, del Trattato dell’Unione Europea, regolano la politica della comunità in materia ambientale: principio della precauzione, dell'azione preventiva, della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente: “chi inquina paga”. Il principio dello sviluppo sostenibile, cui dovrebbe informarsi l'attività dei singoli e della pubblica amministrazione, è fissato dall'articolo 3 quater. Il nuovo “Testo Unico sull’Ambiente” è diventato definitivamente operativo con il Decreto Legislativo 3 aprile 2006 “Norme in materia ambientale” pubblicato sul S.O. 96/L alla Gazzetta Ufficiale n°88 del 14/04/2006.

Per quanto riguarda la Parte IV “Gestione dei rifiuti e bonifica dei siti contaminati” la nuova legge, in conformità con quanto stabilito dalla normativa comunitaria, accorpa tutte le disposizioni emanate successivamente al Decreto Ronchi (DLgs 22/1997). Le principali novità introdotte sono di seguito riportate:

1) Integrazione della disciplina contenuta nell'articolato con le altre parti del decreto nonché con gli ulteriori provvedimenti di recepimento delle direttive comunitarie in materia;
2) Individuazione ed abrogazione delle disposizioni incompatibili e definizione di una disciplina transitoria
3) Revisione della disciplina delle bonifiche;
4) Ridefinizione delle priorità nella gestione dei rifiuti in conformità a quelle stabilite dalla normativa comunitaria, senza porre gradi di gerarchia fra il recupero di materie prime secondarie ed il recupero energetico;
5) Introduzione della possibilità di stipulare accordi di programma, ai fini di assicurare il controllo sui rifiuti dal momento della loro produzione sino alla relativa trasformazione in materia prima secondaria;
6) Miglioramento della definizione di deposito temporaneo, chiarendo definitivamente l'alternatività della disciplina a livello temporale e quantitativo, già presente dalla normativa vigente;
7) Introduzione di una disciplina specifica sulla terra e roccia da scavo e sui materiali edilizi inerti non inquinanti;

8) Revisione della disciplina in materia di catasto dei rifiuti e di trasporto, prevedendo la soppressione dell'obbligo di denuncia al catasto per i produttori di rifiuti non pericolosi industriali, commerciali e artigianali;
9) Ridefinizione dell'organizzazione del servizio di gestione dei rifiuti per Ambiti territoriali ottimali, individuati dalle Regioni;
10) Previsione della gestione associata delle funzioni degli enti locali ricadenti nel medesimo Ambito territoriale ottimale, mediante l'istituzione di appositi enti;
11) Definizione delle modalità di affidamento del servizio;
12) Previsione di una Autorità di vigilanza sulle risorse idriche e sui rifiuti, con il compito di assicurare l'osservanza delle disposizioni in materia. L'Autorità è articolata in due sezioni, una proposta alla vigilanza sul settore idrico, l'altra alla vigilanza su quello dei rifiuti; essa assorbe anche le funzioni del Comitato di vigilanza sull'uso delle risorse idriche e dell'Osservatorio nazionale sui rifiuti che divengono sostanzialmente le due sezioni operative dell'Autorità;
13) Razionalizzazione delle discipline in maniera di autorizzazioni;
14) Adeguamento della disciplina sulla gestione degli imballaggi alle direttive comunitarie;
15) Complessiva rivisitazione della tariffa per la gestione dei rifiuti urbani;
16) Aggiornamento e rivisitazione dell'apparato sanzionatorio.

È prevista una modifica della tariffa per la gestione dei rifiuti urbani ed un meccanismo premiale per le imprese virtuose. La legge riorganizza la disciplina dei consorzi di raccolta attraverso l'introduzione di istituti che assicurino la massima concorrenzialità nella gestione del sistema e consente di costituire nuovi consorzi di filiera.

Per il settore delle opere infrastrutturali, è interessante la parte che riguarda la classificazione dei rifiuti. Il nuovo Testo Unico stabilisce che le materie prime seconde, se hanno fin dall'inizio le caratteristiche che le qualificano come tali, non sono mai soggette al regime dei rifiuti. Il testo rimanda ad un successivo regolamento che fissi le caratteristiche delle materie prime seconde e stabilisce che, nel frattempo, si applicano il DM 5 febbraio 1998 e il DM 12 giugno 2002 n. 161,

relativi ai rifiuti non pericolosi e pericolosi. Il Testo Unico introduce la nozione di "sottoprodotto": si tratta di materiali che pur non essendo il prodotto principale del ciclo produttivo, non sono residui ma prodotti secondari (art. 183). Relativamente alle terre e rocce da scavo (art. 186), il nuovo Codice, proseguendo sulla strada già tracciata dalla Legge 443 del 2001, stabilisce i requisiti in base ai quali tali materiali non sono classificati come rifiuti e non sottostanno quindi alla disciplina del decreto Ronchi. Si fa notare che, in tema di codici CER, il D.M. 2 maggio 2006 (Supplemento ordinario n.123 alla Gazzetta Ufficiale 18 maggio 2006 n.114) reca - all'allegato C - uno schema di trasposizione dei codici CER individuati nell'Allegato 1,
sub-allegato 1 e nell'Allegato 2, del decreto ministeriale 5 febbraio 1998 con i corrispondenti codici dell'Elenco Dei Rifiuti di cui all'allegato D, parte IV del Dlgs 152/2006 ai sensi della decisione 2000/532/Ce e successive modificazioni.

2.2.8 – Il passaggio dal MUD al SISTRI

Il D. Lgs. 152/2006 ha comunque delineato e definito il superamento dell'attuale sistema di contabilizzazione dei rifiuti speciali ma, con il Decreto ministeriale del 17 dicembre 2009, pubblicato nella G.U. del 13 gennaio 2010 ed entrato in vigore il giorno successivo, è stato introdotto il Sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), che ha come obiettivo la totale informatizzazione della filiera dei rifiuti speciali. L'entrata in vigore del Sistri ha visto tre proroghe, un'abrogazione e la sua reintroduzione, avvenuta il 14 settembre 2011, quando il Parlamento ha licenziato e quindi emanato il decreto legge 138/2011, convertito in legge 148/2011.

In particolare l'art. 6 del DL 138/2011 prevede:

- fino al 15 dicembre 2011 la verifica tecnica delle componenti software e hardware del sistema Sistri, anche ai fini dell'eventuale implementazione di tecnologie di utilizzo più semplice, rispetto a quelle attualmente previste, organizzando, in collaborazione con le associazioni di categoria maggiormente rappresentative, il test di funzionamento con l'obiettivo della più ampia partecipazione degli utenti;

- l’avvio del Sistri, per le imprese che hanno fino a dieci dipendenti ad una data non antecedente il 1° giugno 2012. A tale riguardo il Ministero dell’Ambiente deve ancora definire la data in questione;
- dal 9 febbraio 2012 l’avvio del Sistri per le imprese e gli enti produttori di rifiuti speciali pericolosi e/o non pericolosi che hanno più di dieci dipendenti, per le imprese che effettuano il trasporto dei rifiuti, per gli intermediari e i commercianti di rifiuti e per le imprese che effettuano operazioni di recupero e smaltimento dei rifiuti (in pratica tutti i gestori di rifiuti);
- entro il 15 dicembre 2011, l’emanazione di un decreto ministeriale, nel quale dovranno essere individuate specifiche tipologie di rifiuti, per le quali, in considerazione della quantità e dell’assenza di specifiche caratteristiche di “criticità ambientale”, potrà continuare l’attuale gestione amministrativa e quindi non saranno vincolate all’utilizzo del programma informatizzato del Sistri. Questo significa che potranno continuare con l’attuale registro di carico e scarico dei rifiuti, l’utilizzo del formulario per la fase del trasporto dei rifiuti, quando smaltiti o avviati al recupero, e la presentazione del MUD entro il 30 aprile di ogni anno;
- - che gli enti e le imprese che producono esclusivamente rifiuti soggetti al ritiro obbligatorio da parte di sistemi di gestione regolati per legge possano delegare gli adempimenti relativi al Sistri ai consorzi di recupero (sistema CONAI, COBAT, Consorzi pneumatici, RAEE, Polieco, ecc.).

2.2.9 – Decreto Legislativo 16 Gennaio 08’ n.4, “Ulteriori disposizioni correttive e integrative del Decreto Legislativo 3 Aprile 06’ n.152, Recante Norme in Materia Ambientale”

Il decreto, nel rivisitare completamente la materia in tema di VIA e VAS, apporto sostanziali modifiche alla disciplina delle acque ed a quella, che qui interessa particolarmente, sui rifiuti, ponendo rimedio a non pochi errori ed incongruenze del testo originario. Vengono indicati i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti, promuovendo anche la prevenzione e la riduzione della produzione e della nocività dei rifiuti (articoli 178 e 179) con lo scopo evidente di limitare al massimo la loro produzione le conseguenze dello smaltimento, privilegiandone il recupero mediante riciclo, reimpiego, riutilizzo o ogni altra azione finalizzata all'ottenimento di materie

prime secondarie che, conseguentemente alle modifiche apportate dal D.L.vo 4/2008 all'articolo 1792, sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia, anch'esso contemplato della disposizione citata. Tenendo conto del disposto degli articoli illustrati in precedenza, appare di tutta evidenza che la gestione dei rifiuti viene disciplinata in modo tale da privilegiare il recupero e limitare il più possibile lo smaltimento.

L’art. 181 (oggetto di intervento con il correttivo del 2008) prevede, dunque, che le autorità competenti favoriscano il recupero mediante:

- attività di riutilizzo, il riciclo o le altre forme di recupero dei rifiuti;
- l'adozione di misure economiche e la determinazione di condizioni di appalto che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti al fine di favorire il mercato dei materiali medesimi;
- l'utilizzazione dei rifiuti come combustibile o come altro mezzo per produrre energia;
- la promozione di analisi dei cicli di vita dei prodotti ecobilanci, informazioni;

L'ultimo comma dell'articolo 181 indica chiaramente che la disciplina in materia di gestione dei rifiuti si applica fino al completamento delle operazioni di recupero, al termine del quale sono da considerarsi materiali diversi. Con il D.L.vo 4/2008 è stato inoltre introdotto l'articolo 181 bis che disciplina materie, sostanze e prodotti secondari.

Tali materie non rientrano nella categoria dei rifiuti a condizione che rispettino i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

a) siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti;
b) siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre;
c) siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse;
d) siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e

standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo o dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario;

e) abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.

Pur in presenza delle modifiche apportate permane la necessaria sussistenza dell'ulteriore condizione che i detentori di detti materiali non se ne disfino o non abbiano deciso o non abbiano l'obbligo di disfarsene trattandosi, in questo caso, di azioni che qualificano il materiale medesimo come rifiuto. Per quanto riguarda invece lo smaltimento, l’art. 182 ne evidenzia la natura di fase residuale dell'attività di gestione indicando i criteri generali cui attenersi.

Si rileva così che lo smaltimento deve essere effettuato:

- in condizioni di sicurezza;
- quando si sia verificata l'impossibilità tecnica ed economica di procedere al recupero;
- riducendo il più possibile, sia in massa che in volume, i rifiuti da avviare allo smaltimento finale potenziando la prevenzione e le attività di riutilizzo, di riciclaggio e di recupero;
- ricorrendo ad una rete integrata ed adeguata di impianti di smaltimento, attraverso le migliori tecniche disponibili e tenuto conto del rapporto tra i costi e i benefici complessivi. Il sistema, così delineato, segui principi di autosufficienza attraverso lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in ambiti territoriali ottimali; prossimità, attraverso l'utilizzazione degli impianti al luogo di produzione o raccolta dei rifiuti per limitarne i movimenti sul territorio e protezione dell'ambiente e della salute mediante il ricorso a tecnologie adeguate;
- gettando lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in regioni diverse da quelle dove gli stessi sono prodotti, salvo casi particolari;

Complementare alla nozione di rifiuto è quella di “ sottoprodotto" contenuta nella lettera p) dell’art. 183, precedentemente non contemplata dal D.L.vo 4/2008. Nella relazione illustrativa che accompagnava il testo del 2006 specificato che la definizione di "sottoprodotto" veniva adottata in conformità ad una serie di sentenze comunitarie. La definizione originario di sottoprodotto, già contenuta nell'articolo 183 lettera n), è stata completamente rivisitata nel nuovo testo introdotto nel 2008.

Si legge ora, nell'articolo 183 lettera p) che sono sottoprodotti "le sostanze ed i materiali dei quali il produttore non intende disfarsi ai sensi dell'articolo 1831, lettera a)".

I sottoprodotti devono inoltre soddisfare tutti seguenti criteri, requisiti e condizioni:

17) siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione;
18) il loro reimpiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito;
19) soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad immissioni e ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati;
20) non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione;
21) abbiano un valore economico di mercato.

La sussistenza delle condizioni indicate deve essere contestuale e, anche in mancanza di uno solo di essi, il residuo rimarrà soggetto alle disposizioni sui rifiuti.

2.2.10 – I pneumatici dismessi

Il D.Lgs. n. 36 del 13/01/2003 “attuazione della direttiva 99/31/CE” con l’Art.6 ha bandito, a partire dal 16 luglio 2003, il conferimento in discarica dei pneumatici tal quali mentre, a partire dal 16 luglio 2006, ne esclude il conferimento anche in forma triturata decretando in questo modo la necessità di attuare concretamente forme idonee di trattamento e recupero dei pneumatici a fine vita.

La gestione degli pneumatici fuori uso è disciplinata dall'articolo 228 il quale richiama le disposizioni speciali in materia di veicoli fuori uso (D.L.vo 209/2003) e quelle generali di cui agli articoli 179 e 180 allo scopo di ottimizzarne il recupero e per ridurne la formazione anche attraverso la ricostruzione.

Per far ciò, il primo comma obbliga produttori e importatori a provvedere alla gestione di quantitativi di pneumatici fuori uso pari a quelli da loro immessi sul

mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale. L'onere derivante dall'obbligo suddetto grava in parte, come sancito dal comma secondo, anche sull'utente finale, il quale è tenuto a versare un contributo il cui importo dovrà essere indicato in fattura in tutte le fasi della commercializzazione.

Diversamente da quanto indicato nell'originaria indicazione del D.L.vo 22/1997, la nozione di rifiuti è attualmente ristretta ai soli pneumatici "fuori uso" (voce 16.01.03 dell'Elenco dei rifiuti), che il recente Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, n. 82 recante "Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso (PFU), ai sensi dell'articolo 228 del D.L.vo 3/04/06, n.152 e successive modificazioni e integrazioni, recante disposizioni in materia ambientale", in vigore dal 7/06/11, individua negli "*pneumatici, rimossi dal loro impiego a qualunque punto della loro vita, dei quali il detentore si disfi, abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi e che non sono fatti oggetto di ricostruzione o di successivo riutilizzo*". Si precisa che "(…) esulano dalla nozione di rifiuto solo i materiali residuali di produzione o di consumo che siano effettivamente riutilizzati senza subire alcun trattamento preventivo, ovvero subendo un trattamento preventivo che non importi un operazione di recupero" (così Cass. Sez. III n.46643 del 14 dicembre 2007, Messina).

2.3 – Incentivi per il recupero

2.3.1 – Le disposizioni contenute nella Legge 448 /2001

La finanziaria del 2002 (Legge 448/2001) ha introdotto nell'ordinamento una disposizione che impone alle Pubbliche Amministrazioni ed alle società a prevalente capitale pubblico di coprire il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo. L'articolato di legge collega l'attuazione dell'obbligo all'emanazione di disposizioni tecniche che sono contenute nel decreto del Ministero dell'Ambiente n. 203 dell'8 maggio 2003.

2.3.2 – Decreto del Ministro dell'Ambiente 203/200, Repertorio di Riciclaggio

L'art. 3, comma 3 del DM 203/2003 ha ampliato lo spettro di applicazione della norma contenuta nella legge finanziaria del 2002 estendendo l'obbligo a tutti i

settori della pubblica amministrazione e quindi anche alle opere pubbliche. In conseguenza di ciò, ogni Pubblica Amministrazione si è trovata nell'obbligo di inserire nei propri capitolati d'appalto la necessità di prevedere l'impiego di materiali riciclati.

Il decreto stabilisce le metodologie di calcolo e la definizione di materiale riciclato, ed individua più precisamente le finalità ed i destinatari. Viene istituito il Repertorio del Riciclaggio, che è un elenco di prodotti realizzati con materiale riciclato a cui le pubbliche amministrazioni possono attingere per adempiere all'obbligo di soddisfare almeno il 30% del proprio fabbisogno. Vi sono indicate, distintamente per ogni prodotto o manufatto, le condizioni di offerta, la disponibilità e la congruità del prezzo.

Il Repertorio del Riciclaggio è gestito dall'Osservatorio Nazionale dei Rifiuti (ente di controllo presso il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio).

Il decreto stabilisce le procedure da seguire per ottenere l'iscrizione dei prodotti nel Repertorio, orientate alla qualificazione del prodotto, che deve garantire livelli di qualità e di sicurezza ambientale idonei ai diversi impieghi ai quali può essere destinato.

L'iscrizione al repertorio di un prodotto avviene sulla base di una domanda che l'azienda produttrice invia all'Osservatorio, corredata da documentazione tecnica specifica per ogni settore e dai seguenti dati:

- codici dell'elenco europeo dei rifiuti con il quale viene realizzato il materiale o il manufatto;
- la percentuale di rifiuti nel materiale riciclato, che dovrà rispettare i limiti stabiliti in apposite circolari;
- un Tecnico responsabile;
- una relazione tecnica indicante le eventuali differenze prestazionali tra il bene o il manufatto in materiale riciclato e analogo bene o manufatto realizzato con materiale vergine, evidenziando la conformità qualitativa del prodotto.

É stato necessario elaborare, per ciascun settore applicativo, alcune disposizioni di riferimento che tengano conto delle condizioni tecniche specifiche di utilizzo. Tali disposizioni sono rese note con Circolari emanate dal Ministero dell'Ambiente. Vi

debbono essere dettagliate le condizioni particolari di iscrivibilità nel Repertorio del Riciclaggio e le condizioni minime che permettono di rispettare i seguenti requisiti: limite, in termine di peso, di rifiuti nel materiale riciclato. L'imposizione riguarda in linea generale sia il limite minimo sia il limite massimo, il primo volto a garantire un beneficio sensibile rispetto alla riduzione del prelievo di materiale vergine e dei conferimenti a discarica, il secondo traduce considerazioni di opportunità e di cautela rispetto alla qualità dei beni ed al buon esito delle costruzioni realizzate con materiali riciclati. Le circolari applicative già emanate che possono avere interesse per il settore stradale sono le seguenti:

- plastica (circ. 04/08/2004 pubblicata sulla GU n. 191 del 2004);
- rifiuti inorganici da demolizione e manutenzione, nonché conglomerato bituminoso da scarifica (circ.5205 del 15/07/05 pubblicata sulla GU n.171 del 25/07/05);
- articoli in gomma (circ. 19/07/2005).

La seconda in elenco riguarda la stragrande maggioranza delle applicazioni, mentre il recupero di plastica e gomma ha costituito finora quasi solamente un argomento di ricerca e sperimentazione.

2.3.3 – Circolare n. 5205 del 15 Luglio 05', pubblicata in Gu n. 171 del 05'

La Circolare n. 5205 è intitolata "Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del D.M. 203/2003" e costituisce un riferimento di carattere generale per tali settori, in quanto prevede che le due famiglie di materiali ivi esplicitamente individuate (rifiuti inorganici post-consumo derivanti da demolizione e manutenzione di opere edili ed infrastrutturali, nonché conglomerato bituminoso post-consumo ottenuto da scarifica di pavimentazioni stradali) non siano le sole iscrivibili nel Repertorio.

A differenza di quanto attiene la prima famiglia di materiali cui è rivolta la norma, per il conglomerato bituminoso ottenuto da scarifica di pavimentazioni stradali la circolare non è altrettanto dettagliata, ma può individuarsi sostanzialmente la destinazione d'impiego (categoria di prodotto) di aggregato per conglomerati bituminosi (da presumersi, per l'assenza di disposizioni contrarie, sia a caldo, sia a freddo).

É indicato solamente il limite minimo in peso, che, allo stato attuale della tecnologia è fissato nel 20%. Il limite massimo non è fissato, poiché è dipendente dai requisiti prestazionali richiesti alle varie miscele e rapidamente variabile in relazione ai progressi nelle tecniche e nei macchinari.

2.3.4 – Circolare del 19 Luglio 05’, pubblicata in Gu n. 173 del Luglio 05’

Questa circolare ha individuato prescrizioni e requisiti per rendere operativo l’impiego di beni e manufatti ottenuti con materiale riciclato da rifiuti in gomma nei settori dell’edilizia, dell’arredo urbano e stradale, dell’infrastruttura viaria, tranviaria e portuale e dei prodotti per opere di ingegneria civile.

Per quanto riguarda i materiali, i manufatti ed i prodotti ottenuti dalle attività di recupero di articoli in gomma, la circolare in oggetto ne individua un cospicuo gruppo.

Tra questi, di particolare interesse per il settore delle infrastrutture viarie, sono:

- Conglomerati cementizi modificati con granulo di gomma;
- Conglomerati bituminosi con granulo di gomma (tecnica dry)
- Bitumi modificati con polverino di gomma (tecnica wet);
- Barriere stradali, spartitraffico, attenuatori d’urto ad assorbimento;
- Barriere antirumore e/o fonoassorbenti;

Si tratta di materiali, manufatti e beni riciclati eterogenei che comprendono una casistica molto ampia, tanto da condizionare la stessa possibilità di definire un criterio specifico per ciascuna di esse per determinare il limite in peso dei rifiuti utilizzati per la produzione. Al fine di agevolare il compito del tecnico e dell’impresa la circolare individua a titolo esemplificativo alcuni limiti minimi relativi alla percentuale di rifiuto in gomma post-consumo sul totale del materiale:

- Conglomerati cementizi modificati con granulo di gomma = 5%
- Conglomerati bituminosi con granulo di gomma (tecnica dry) = 3%
- Bitumi modificati con polverino di gomma (tecnica wet) = 8%

2.3.5 – Disposizioni regionali, locali e prassi amministrativa

Le disposizioni del D.M. 203/2003, non sono da sole sufficienti per conseguire l'obiettivo della quota pari al 30% di materiale riciclato; al contrario richiedono ulteriori e specifiche disposizioni applicative e di dettaglio che, per gli enti regionali, devono essere adottate dalle Regioni (art. 19, comma 4, D.Lgs n. 22/97): "*Le Regioni, sulla base di metodologie di calcolo e della definizione di materiale riciclato stabilite da apposito decreto del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, di concerto con i Ministeri delle attività produttive e della salute, sentito il Ministro per gli affari regionali, adottano, entro 60 giorni dalla data di entrata in vigore del suddetto decreto le disposizioni occorrenti affinché gli uffici e gli enti pubblici, e le società a prevalente capitale pubblico, anche di gestione dei servizi, coprano il fabbisogno annuale dei manufatti e beni, indicati nel medesimo decreto, con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo*".

Ai sensi del comma 3, dell'articolo 3, del DM 203/2003, per rispettare l'obbligo della quota del 30%, tutti i destinatari sono tenuti a inserire delle clausole specifiche o particolari condizioni "in sede di formazione di una gara per la fornitura e l'installazione di manufatti e beni, e nella formulazione di capitolati di opere pubbliche".

Le circolari N. 5205 del 15 luglio 2005 e 19 luglio 2005 già descritte, precisano che tale obbligo nasce "nel momento in cui i prodotti iscritti al repertorio del riciclaggio presentano contestualmente: medesimo uso, ancorché con aspetto, caratteristiche o ciclo produttivo diversi e prestazioni conformi all'utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini".

Quest'ultima rappresenta una condizione *necessaria* ma *non sufficiente* per gli uffici ed enti regionali e per tutte le società a prevalente capitale pubblico regionale.

Per questi ultimi, infatti, è richiesta una ulteriore condizione rappresentata dall'adozione di apposite disposizione da parte della Regione competente come previsto dall'art. 19, comma 4 del DLgs. 22/97 precedentemente citato.

2.3.6 – Accordi di programma

Per promuovere la collaborazione fra pubbliche amministrazioni, soggetti privati ed associazioni di categoria, il “Decreto Ronchi” ha previsto la possibilità che vengano stipulati accordi di programma su base volontaria, che consentono di adeguare l’applicazione delle norme alle specifiche situazioni e condizioni produttive locali. In particolare, gli accordi di programma sono finalizzati:

- alla riduzione della quantità e della pericolosità dei rifiuti, al loro recupero, riutilizzo e riciclaggio ed al conseguimento di livelli ottimali di utenza raggiunta dai servizi di raccolta;
- a favorire il riutilizzo, il riciclaggio ed il recupero dei rifiuti prodotti, con la possibilità di prevedere a questo fine semplificazioni di adempimenti anche amministrativi, nel rispetto dei principi e degli obiettivi stabiliti dalle norme nazionali e comunitarie in materia di rifiuti;
- aumentare la conoscenza del flusso dei rifiuti e di conseguenza il loro controllo;
- promuovere la ricerca, l’innovazione e l’utilizzo di materie prime alternative.

Con riferimento alla realtà della Regione Emilia Romagna, l’Accordo di Programma per il recupero dei residui da costruzione e demolizione della Provincia di Bologna dà concreta attuazione a questi principi e costituisce un valido esempio di questo tipo di disposizioni applicative ma, per non appesantire ulteriormente la panoramica presentata, di per sé già molto complessa, viene tralasciata la sua esposizione.

Capitolo 3 – La lavorazione dei PFU

3.1 – Introduzione

La crescita esponenziale del mercato dei PFU, in virtù di una vasta disponibilità dei materiale e concorrenzialità con i prodotti di stampo tradizionale, fanno si che questi risultino un'ottima risorsa nell'ottica di sviluppo sostenibile.

I pneumatici infatti godono di una serie di proprietà intrinseche quali:

- vita media superiore ai 50 anni;
- resistenza alla muffa;
- " al calore;
- " all'umidità;
- " ai raggi UV;
- " agli agenti chimici, acidi ed olii;
- buone capacità elastiche e di resistenze agli urti;

Per contro però, essi risultano una particolare tipologia di rifiuto difficilmente riciclabile, la normativa in materia di rifiuti si è pronunciata in merito alle attività di trattamento, recupero e/o smaltimento per materiale C&D.

I pneumatici più che rientrare nella definizione di rifiuti ai sensi *dell'art.183 lettera a – D.lgs 152/2006,* si meglio collocano in quella di sottoprodotto o materia prima seconda (MPS), ai sensi *dell'art. 183 lettera p – D.lgs 152/2006*, " *sostanze ed i materiali dei quali il produttore non intende disfarsi*" ai sensi *dell'art. 183, comma 1, lettera a*, che soddisfino tutti i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

1) siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione;

2) il loro impiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito;

3) soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad emissioni e ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati;

4) non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione;
5) abbiano un valore economico di mercato.

Vengono definiti MPS ai sensi *dell'articolo 183 lettra q – D.lgs 152/2006, "la sostanza o materia avente le caratteristiche stabilite ai sensi dell'articolo 181-bis*. Ovvero: *Non rientrano nella definizione di cui all'articolo 183, comma 1, lettera a), le materie, le sostanze e i prodotti secondari definiti dal decreto ministeriale di cui al comma 2, nel rispetto dei seguenti criteri, requisiti e condizioni: a) siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti; b) siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre; c) siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse; d) siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo o dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario; e) abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.*

3.2 – Il mercato dei PFU in Europa

Nel 2009 l'Unione Europea ha affrontato la sfida di gestire, nel rispetto di criteri ecologici, 3.2 milioni di tonnellate di pneumatici usati PU, di cui 581 mila tonnellate vengono avviate al riutilizzo, ricommercializzate o esportate, mentre circa 2.6 milioni di tonnellate rimangono nel mercato come PFU. I dati raccolti dall'ERTMA (European Rubber & Tyre Manufactorers' Association) mostrano che la gestione di una tale mole di materiale è stata possibile solo con la diffusione di sistemi di gestione in grado valorizzare i materiali attraverso il riciclaggio. Il problema è aggravato dalla presenza di discariche interrate di PFU, stimati in circa 5.5 milioni di tonnellate. La ricerca e la promozione di metodi innovativi per il trattamento e il riciclo tende a creare un mercato sostenibile per i derivati dei PFU in grado di assorbire nei prossimi anni questi materiali stoccati in depositi pericolosi.

La nascita di prodotti innovativi sia per le industrie che per i consumatori ha permesso negli ultimi 16 anni un aumento costante del tasso di raccolta dei PFU, fino a raggiungere il 95% nel 2009. La Figura 3.1 mostra tale andamento, con una crescita media annua del 25% delle quantità recuperate, costituendo un riscontro positivo dell'efficacia delle politiche di gestione adottate.

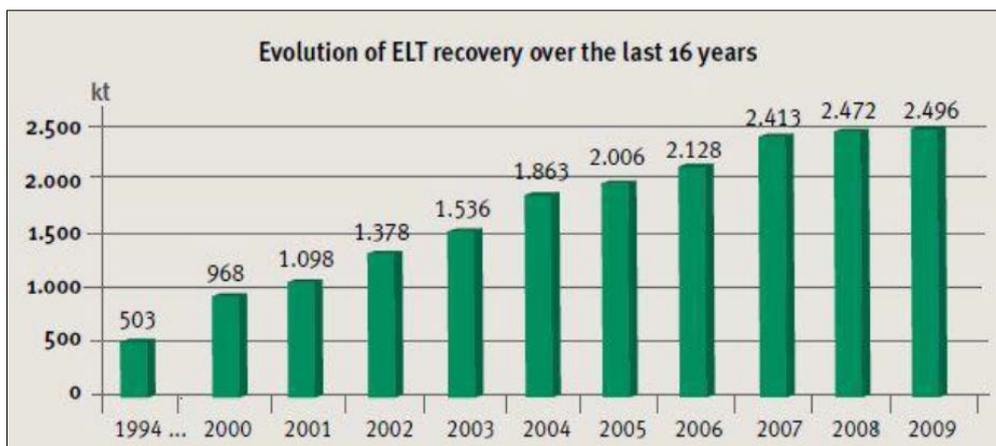



Fig.3.1 - Evoluzione del Recupero di PFU negli Ultimi 16 Anni

Oggi in Europa esistono tre diversi sistemi di gestione dei PFU:

- Sistema a tassazione: vige in Danimarca e Slovacchia. Ciascun paese è responsabile per il recupero e il riciclo dei PFU. I produttori pagano una tassa allo Stato che è responsabile dell'organizzazione e remunera gli operatori nella catena del recupero. La tassa viene successivamente applicata al consumatore;
- Libero mercato: vige in Austria, Bulgaria, Croazia, Germania, Irlanda, Regno Unito e Svizzera. La legge stabilisce gli obbiettivi da raggiungere e i referenti per i singoli settori di attività ma non prevede il responsabile di filiera. In tal modo tutti gli operatori del sistema stipulano contratti secondo le condizioni del libero mercato e agiscono in conformità con la locale legislazione sui rifiuti;
- Responsabilità del produttore: vige in Belgio, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Polonia, Paesi Bassi, Portogallo, Romani, Slovenia, Spagna, Svezia, Turchia, Ungheria. La legge definisce l'assetto legale e conferisce la responsabilità ai produttori di organizzare la gestione dei PFU. Questo sistema ha portato alla costituzione di società senza scopo di lucro

per gestire i PFU attraverso le soluzioni più economiche. I produttori hanno l'obbligo di monitorare e rendicontare alle autorità nazionali, il che rappresenta un buon esempio di trasparenza e tracciabilità. I costi di gestione sono pagati attraverso un contributo indicato chiaramente al momento dell'acquisto dagli utenti, attraverso il principio "chi inquina paga".

L'obbiettivo comune di tali sistemi è lo smaltimento dei PFU tramite il recupero di materiali ed energia, da cui si traggono vantaggi ambientali e economici: il riutilizzo di una risorsa che, se non recuperata, sarebbe non biodegradabile ed andrebbe ad occupare depositi e discariche con gravi danni per l'ambiente e la salute; la bonifica di discariche o depositi abusivi; l'impiego al posto di preziose materie prime, spesso d'importazione; la riduzione della quantità di rifiuti e conseguentemente minori costi per la collettività; miglioramento della bilancia commerciale relativamente a importazione di combustibili tradizionali.

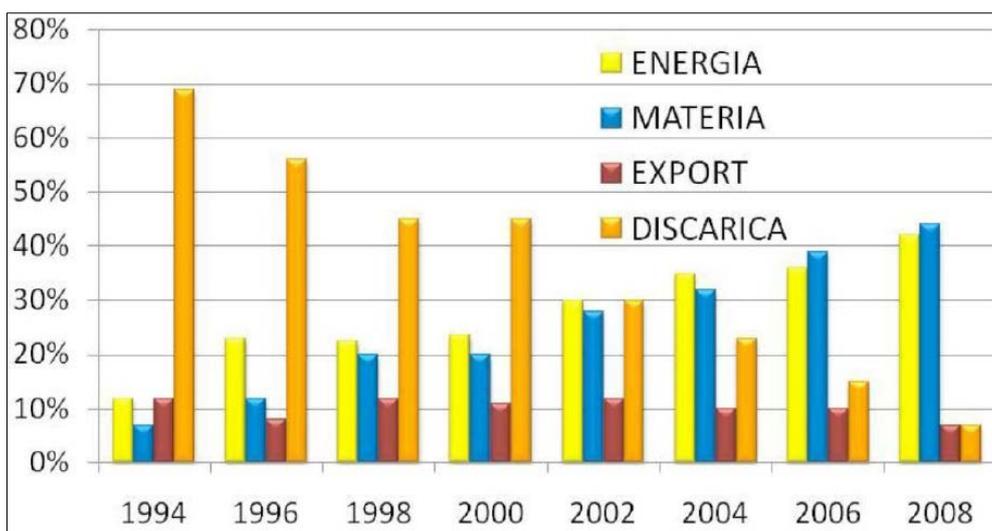



Fig.3.2 - Principali Utilizzi dei PFU in Europa (Fonte: ETRMA, 2008)

Il PFU grazie alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale, si presta per l'utilizzo in numerose applicazioni sotto forma di granulo di varie dimensioni. Inoltre è caratterizzato da un potere calorifico pari a quello del carbone e ciò lo rende fonte energetica oggi largamente usata per soddisfare la domanda di settori industriali come i cementifici e le centrali di produzione di energia/vapore, che lo utilizzano sotto vari formati (ciabattato, cippato o intero). In Figura 3.2 sono mostrati i principali utilizzi dei PFU in Europa dal 1994 al 2008, mostrando un consistente aumento del recupero di materia, che è passato dal 6% del 1994 a oltre il

40% del 2008. Per quanto attiene l'Italia, l'Ecopneus, secondo stime di massima, valuta la produzione annuale di PFU in 380.000 tonnellate, di cui 180.000 sono avviati al recupero energetico, 100.000 al recupero di materiale, mentre la quota rimanente viene dispersa in traffici e pratiche illegali o comunque fuori controllo. L'assenza di un sistema integrato di gestione a livello nazionale ha generato una situazione caratterizzata da un mancato controllo sui flussi di questo materiale, insufficiente implementazione di utilizzi di PFU e suoi derivati, assenza di una razionalizzazione tra le parti del sistema di gestione. Queste carenze non permettono di garantire la tutela dell'ambiente, come è evidenziato da numerosi casi di discariche illegali, abbandoni e incendi di PFU ben documentati dal dossier di Legambiente "Copertone selvaggio". Oggi sono circa 30.000 i punti in cui viene generato il PFU: gommisti, stazioni di servizio, officine, sedi di flotte su tutto il territorio nazionale. Migliaia sono poi le aziende autorizzate al prelievo e al trasporto, con destinazione agli oltre 50 impianti di trattamento, siti in cui i PFU vengono preparati per il successivo recupero energetico o di materiale.

3.3 – Tecnologie per il recupero dei PFU

L'esigenza di trovare una soluzione adeguata al riciclaggio dei pneumatici fuori uso è avvertita in modo pressante dai gestori, specie pubblici (aziende urbane di igiene ambientale), ed è stata proposta per questo non una semplice termovalorizzazione di rifiuti, ma un processo di trattamento complesso per il recupero di materie prime.

Si sono perciò iniziati a sviluppare procedimenti di riciclo finalizzati a separare i vari componenti dei pneumatici così da poter recuperare gran parte della materia prima utilizzata. In tal modo sono nati veri e propri impianti innovativi di smaltimento di PFU finalizzati alla produzione di materia prima secondaria.

In impianto è possibile attraverso un processo di frantumazione in cascata, ottenere, a partire dal pneumatico post-consumo, granuli di gomma di varie granulometrie (il cui impiego sarà discusso in seguito), mentre i filamenti di acciaio saranno separati magneticamente e pronti a essere riciclati. La parte di tessuto presente sarà separata attraverso particolari setacci per evitare una contaminazione del prodotto finito.

Le numerose tecnologie in via di sviluppo per l'utilizzo della gomma riciclata fanno si che questa venga utilizzata nelle più svariate granulometrie ed è quindi importante

poter creare 2-3 stazioni di accumulo del granulo di gomma, operazione resa molto semplice dal meccanismo di produzione in cascata.

Le principali peculiarità di questo processo possono essere così sintetizzate:

- **Ambientali:**

  - riutilizzo di una risorsa che se non recuperata sarebbe non biodegradabile e occuperebbe grandi spazi;

  - l’impianto per le sue caratteristiche ha un impatto ambientale insignificante e non crea inconvenienti di rumorosità e esalazioni;

  - possibilità di bonificare discariche o depositi abusivi; l’impianto è infatti in grado di adattarsi a qualsiasi tipo di collocazione, integrandosi nel territorio senza arrecare disturbo alla popolazione;

  - contributo alla diffusione della cultura di rispetto per l’ambiente e a una maggiore sensibilità per la raccolta differenziata.

- **Economiche**

  - Riduzione della quantità di rifiuti e quindi di costi per la collettività.

  - Recupero di acciaio.

  - Produzione di materia prima secondaria economicamente vantaggiosa da acquistare rispetto alla gomma vergine.

Esistono impianti di triturazione del pneumatico molto diversi tra loro, sia per quanto riguarda la tecnologia sia per la qualità e le caratteristiche del prodotto finito:

- Processi elettrotermici

- Water-jet

- Processi criogenici

- Triturazione meccanica

3.3.1 – Processi elettrotermici

Nel **processo elettrotermico** il pneumatico viene ridotto in pezzatura grossolana e introdotto in un forno verticale a induzione elettromagnetica. La parte metallica viene sottoposta al campo elettromagnetico e si riscalda rapidamente fino a temperature di circa 700°C. A queste temperature la gomma carbonizza all'interfaccia e il metallo si distaccano. Nella parte bassa del forno vengono raccolti separatamente il materiale metallico, la gomma inalterata e la gomma carbonizzata.

Con i processi di de-vulcanizzazione e rigenerazione, la gomma, preventivamente triturata, viene riportata ad una struttura chimica vicina a quella dell'elastomero di partenza, in maniera tale da permettere l'aggiunta alle normali mescole in percentuali relativamente alte.

3.3.2- Water –jet

La tecnologia "water jet" sfrutta un getto d'acqua ad alta pressione (150 - 400 Mpa), il quale permette la disgregazione e polverizzazione della gomma, lasciando la carcassa dello pneumatico, costituita da una rete di fili in acciaio intatta e perfettamente ripulita. Tale lavorazione infatti, ha un'azione molto selettiva sui component, consentendo di produrre un materiale metallico molto pulito, una frazione di gomma a granulometria fine e un residuo tessile riciclabile . Il granulato di gomma così ottenuto viene sottoposto a un processo di essiccazione e vagliatura. Nel caso di richiesta di granulometrie inferiori è possibile eseguire una successiva macinazione fine del granulato, mediante mulini polverizzatori.

3.3.3 – Processi criogenici

Il processo di macinazione meccanica avviene per fasi successive, per mezzo di lame e coltelli rotanti. Possono essere in maniera indifferente pneumatici di autocarri, di auto e scarti di articoli in gomma, il processo è normalmente finalizzato alla produzione di granulato e polverino con un trattamento differenziato, a seconda che si ottengano detti prodotti da pneumatici di auto o di autocarro. Per quest'ultimi infatti si rende necessaria un'operazione preliminare di rimozione del tallone, con la quale vengono separati, senza rottura, i due anelli dallo pneumatico per limitare significativamente l'usura delle macchine di frammentazione. Nella figura seguente

si riporta uno schema generale del funzionamento di un impianto di granulazione criogenica.

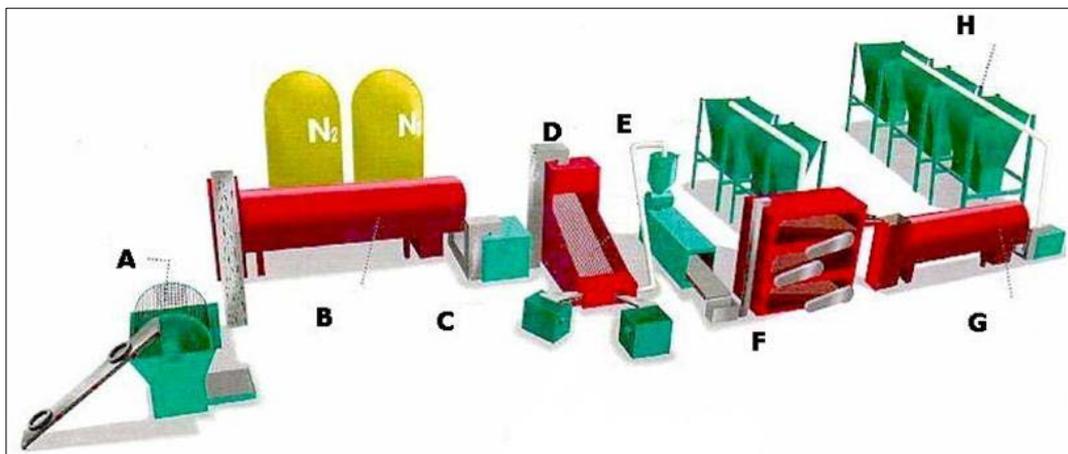



Fig.3.3 – Schema di un impianto di granulazione criogenico

Il processo inizia quindi con una triturazione grossolana preliminare (A) che è simile a quella dell'impianto di granulazione a temperatura ambiente. I frammenti di gomma, della dimensione di circa 5mm, sono raffreddati in un tunnel di raffreddamento che opera in continuo (B) fino a -80 °C o meno, utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma in una fase vetrosa. Questa non è una vera e propria transizione di fase ma con questo termine si indica lo stato in cui la gomma risulta fragile al punto da poter essere facilmente triturata e sminuzzata. In un secondo momento, vengono fatti cadere in un mulino a martelli che opera ad una elevata velocità di rotazione (C). Qui i frammenti di gomma vengono ulteriormente frantumati in modo che la taglia delle particelle sia compresa in un intervallo di ampie dimensioni e, nel contempo, vengono purificati dalle inclusioni di acciaio e fibra. Poiché i granuli di gomma potrebbero essere umidi, è necessario essiccarli (E) prima di lasciare il mulino e venire classificati in ben definite pezzature (F). Al fine di produrre polverino di pneumatico è necessario provvedere ad un secondo stadio di frammentazione criogenica (G). Il prodotto finale viene quindi stoccato in opportuni silos (H).

Questo tipo di tecnologia per la riduzione delle dimensioni richiede meno energia e meno macchinari rispetto al processo a temperatura ambiente. Un altro vantaggio è l'eliminazione di acciaio e fibre che diventa molto più semplice, portando ad un prodotto finito più pulito. La pezzatura del granulo rispetto alla lavorazione a

temperatura ambiente risulta più fine, tendenzialmente più pulito e utilizzabile in applicazioni più sofisticate. Ovviamente lo svantaggio principale di tale trattamento risiede nell'elevato costo dell'azoto liquido. Con questa tecnologia si ottengono polverini di PFU con dimensioni fino a circa 0,2 mm.

3.3.4 – Triturazione meccanica

L'impianto più diffuso e utilizzato è sicuramente quello a triturazione meccanica: la novità tecnologica di questo processo consiste nel metodo di frantumazione che avviene senza l'impiego di gas liquefatti o altri trattamenti chimici o termici. Non c'è quindi alcun cambiamento della struttura cristallina della gomma che non viene alterata in nessuna maniera, mantenendo così ogni sua caratteristica chimico-fisica.

L'innovazione tecnologica che permette di poter arrivare a un granulato di buona qualità attraverso un processo esclusivamente meccanico è economicamente più vantaggioso, e perciò che riguarda l'impatto ambientale è sicuramente preferibile al processo della criogenesi che ci consente di ottenere però una superficie più omogenea e una granulometria più consona alla formazione di una buona miscela.

3.3.4.1 –Analisi del processo produttivo

L'impianto produttivo è studiato per poter trattare assieme o separatamente pneumatici differenti e realizzare granuli di diverse granulometrie, fino ad arrivare a polveri di gomma di dimensioni inferiori a 1 mm, e consentire successivamente la separazione in gruppi di dimensioni differenti attraverso un vaglio rotante.

La separazione avviene secondo un criterio di granulometria e si è scelto di descrivere un processo in grado di poter produrre 3 diverse granulometrie, che sembrano le più appropriate per i vari utilizzi finali e che quindi potranno avere buone possibilità di vendita sul mercato.

Il recupero di PFU è previsto attraverso una sequenza di trattamenti fisici degli stessi, che possono sostanzialmente riassumersi in:

- Introduzione del PFU all'interno del capannone.
- Stallonatura (dei soli pneumatici di automezzi).

- Triturazione (shredder) dello pneumatico con relativa riduzione a pezzature di 100mm X 100mm.
- Granulazione (granulation) del ciabattato con formazione di granuli di dimensioni tra 25mm e 15mm circa.
- Separazione magnetica dei fili di acciaio.
- Macinazione (milling) del semilavorato con formazione di granuli di varie granulometrie, con dimensioni inferiori ai 4 mm.
- Separazione delle fibre tessili dalla gomma.
- Imballaggio dei granuli in appositi big bag.
- Stoccaggio dei big bag.

Analisi delle fasi

I pneumatici vengono portati dal cliente, all'impianto mediante autocarri, autotreni o autoarticolati dotati di cassone ribaltabile, mezzi autorizzati e dotati del rispettivo formulario per il trasporto, questa fase è la **messa in riserva dei rifiuti esterna** (Fig.3.4).

Fig.3. 4 – Riserva dei rifiuti

I pneumatici vengono **stoccati** nella zona retrostante il capannone e vengono movimentati mediante carrello attrezzato con pala, quest'ultimo macchinario ha il compito di trasportare, per la quantità necessaria, i copertoni fino al nastro trasportatore collegato al trituratore (Fig.3.5).

Fig.3. 5 – Carrello con pala

I pneumatici di mezzi pesanti con tallone di grande spessore, prima di essere trasportati al nastro trasportatore, verranno collocati nei pressi del detallonatore per la **stallonatura**.

La stallonatura è la rimozione, attraverso specifici macchinari, dell'anello in acciaio, denominato cerchietto, posto in corrispondenza dell'area del pneumatico che aderisce al cerchione (tallone). La sua funzione è di fornire una pressione adeguata del pneumatico sul cerchio, assicurando solidità meccanica e tenuta dell'aria. Una volta rimosso, il cerchietto può essere recuperato, ad esempio come acciaio da fonderie.

Questa operazione ci consente di separare i due anelli toroidali del pneumatico senza rottura, grazie ad un pistone oleodinamico che aggancia i due talloni e li strappa dalla carcassa. Gli stallonatori, nonostante l'automazione tramite Programmable Logic Controller (PLC), necessitano della supervisione di un operaio specializzato che si occuperà di collocare il pneumatico sul detallonatore, per minimizzare i guasti del macchinario e controllerà i parametri di lavorazione.

La fase successiva è la **triturazione** che consiste nell'introdurre nel trituratore tutti i pneumatici di autovetture, mezzi leggeri e di autocarro senza toroide metallico.

Il prodotto in uscita da questa fase è triturato o ciabattato, ha una pezzatura intorno ai 5 e 40 cm e viene scaricato su un nastro trasportatore (Fig.3.6) che è collegato al successivo impianto.

Fig.3. 6 – Nastro trasportatore

La velocità della triturazione deve rimanere bassa all'interno della macchina per evitare l'adesione delle parti in gomma alle pale, a causa del riscaldamento dei mulini. Sulla macchina sono installate lame intercambiabili e riaffilabili in materiale al nichel trattato termicamente in modo da garantire un lungo periodo di lavorazione. Il funzionamento oleodinamico dei motori mantiene in perfette condizioni tutto il gruppo di rotazione, oltre a consentire il risparmio energetico durante la fluttuazione del carico.

Per la triturazione dei pneumatici giganti è necessario un macchinario più grande e più potente rispetto al tradizionale che è stato descritto.

Nella seconda frantumazione, detta anche fase di **granulazione primaria**, la gomma attraverso un nastro trasportatore arriva in modo dosato a un granulatore (Fig.3.7).

Fig.3.7 – Granulatore

Quando la macchina raggiunge la massima capienza della tramoggia è un sistema automatico a fotocellule a interrompere il lavoro.

Il compito del granulatore primario è quello di diminuire la sezione del triturato in ingresso a una granulometria compresa fra 10 mm e 30 mm che verrà successivamente trasportato all'impianto di raffinazione del granulo. Questo trattamento consente alla gomma triturata di raggiungere un grado elevato di purezza (92%), grazie alla separazione dell'acciaio (Fig.3.8) che viene separato da un separatore magnetico situato a valle del granulatore.

La velocità di rotazione del rotore di questo macchinario è notevolmente più elevata rispetto a quella del trituratore.

Durante questo processo si produce una frazione di tela e gomma polverizzata che deve essere aspirata e abbattuta attraverso un filtro separatore a maniche.

L'acciaio che è stato separato meccanicamente dalla gomma viene rimosso dalla tavola vibrante attraverso un nastro deferrizzatore, costituito da gomma di alta qualità per evitarne la lacerazione nella fase di immagazzinamento dell'acciaio.

Il materiale granulato con dimensioni tra i 16 e i 20 mm viene convogliato su un nastro che arriva a un granulatore secondario.

Fig.3.8 – Separazione dell'acciaio

La gomma che deriva dalla **granulazione secondaria,** detta anche macinazione, è il prodotto finito dell'impianto, che viene ora convogliata in un vaglio rotativo orizzontale in grado di selezionare le differenti frazioni.

Il macchinario ha una struttura molto simile a quella del granulatore ma il mulino e le lame hanno velocità di rotazione maggiore e consentono alla gomma di arrivare a granulometrie dai 4 mm fino a pochi micron e ad una purezza del 99%. Con questa fase si può eliminare dal granulato la presenza della fibra di naylon,, causando però la produzione di una frazione di tele e gomma volatile e sottile che necessita di aspirazione e abbattitura attraverso il filtro separatore a maniche.

Quando la gomma esce dal granulatore secondario è del tutto priva di fibra tessile e per questo è convogliata direttamente su un vaglio rotante, che ha il compito di separare la gomma dalla fibra tessile attraverso una griglia vibrante che lascia cadere il granulo di gomma all'interno di un secondo vaglio rotante mentre la fibra tessile raggiunge l'apposito cassone. Questa fase prende il nome di **stoccaggio di fibra tessile**.

Le fasi di prima e seconda granulazione sono abbinate a un impianto di aspirazione dell'aria. Sono presenti dei camini aspiratori, sovrastanti i macchinari interessati, che prevedono all'asportazione della frazione di tela e gomma volatile, che viene filtrata in due stazioni filtranti, posizionate all'esterno del fabbricato, (Fig.3.9) provviste di maniche autopulenti attraverso aria compressa.

In queste stazioni le polveri più impalpabili contenute nell'aria aspiratoria subiscono un abbattimento e precipitano in una tramoggia di raccolta. Una coclea provvederà a spostare le polveri in prossimità della valvola rotativa che a sua volta scaricherà le polveri in un'apposita cassa. Nella **fase di abbattimento delle polveri**, queste vengono adeguatamente compattate, in modo da avere buona qualità in termini di termovalorizzazione e di ridurre il loro impatto ambientale praticamente a zero.

Fig.3.9 - Stazioni filtranti esterne al fabbricato

3.3.4.2 – Le granulometrie del PFU

Vediamo ora le varie granulometrie che i macchinari di triturazione meccanica, oggi sul mercato, sono in grado di produrre. Le macchine sono di tipologia differente con conseguente differenziazione del prodotto finito, tuttavia ad esso vengono dati i seguenti nominativi che distinguono a grandi linee le loro dimensioni:

1) il **triturato** è il risultato della primissima lavorazione sul PFU, che viene strappato o lacerato in pezzi di circa 300-100 mm (Fig.4.3). Contiene ancora l'acciaio armonico al suo interno e per questo viene definito non biodegradabile, anche se i fili di acciaio, sommersi di acqua in modo continuo e sottoposti a condizioni specifiche di pH, possono dissolversi. Questo prodotto è il risultato di una triturazione molto grossolana dei pneumatici attraverso un "trituratore" di bassa qualità (Fig.3.10), spesso offre una valida soluzione per la semplice riduzione volumetrica dei pneumatici ed è per questo che nel passato la produzione di questa pezzatura veniva

utilizzata solamente per un più comodo abbandono in discarica. Oggi il triturato è utilizzato per la termovalorizzazione.

Fig.3.10 – Trituratore

2) il **ciabattato** è costituito da pneumatici frammentati meccanicamente, lacerati o strappati, modellati irregolarmente in dimensioni di circa 100-20 mm. È il risultato di una triturazione meccanica con macchinari di notevole potenza, generalmente adibiti a usi più gravosi rispetto alla triturazione della gomma. I principali utilizzi di questa granulometria includono: riempimenti leggeri per costruzioni comuni, riempimenti, drenaggi, sottofondi di pavimentazione stradale, costruzione e manutenzione di discariche, piedritti dei ponti e prodotti agricoli. Il ranch di dimensioni chiamato appunto ciabattato può però trarre in inganno, in quanto questo viene spesso utilizzato nella sua pezzatura più fine (20 mm) (Fig.3.11), in quanto questa è la dimensione di norma più gradita e rappresenta un segmento di mercato in continua crescita.

Fig.3.11 – Ciabattato

Il **granulato** è il risultato del processo di riduzione dei pneumatici in particelle finemente disperse di circa 1-20 mm. In questa gamma di pezzatura sono compresi diversi intervalli granulometrici, a seconda dell'applicazione finale; questa operazione viene compiuta da una macchina denominata "*granulator*" (granulatore). La pezzatura più richiesta è dai 2 ai 4 mm (Fig.3.12).

Fig.3.12 – Granulato di gomma

Il **polverino** è il risultato del trattamento del granulato per ottenere particelle finemente disperse al di sotto di 1 mm (Fig.4.7). Questa operazione viene detta macinazione ed è effettuata da un *blades mill* (mulino a lame). Nel suo utilizzo il

polverino rappresenta quasi sempre l'ingrediente di un composto, con il quale viene miscelato, insieme a materia vergine. Infatti è pratica recente l'utilizzo di tale materiale come componente in piccola percentuale per la mescola di nuovi pneumatici.

Fig.3.13 - Polverino

3.3.4.3 – Sottoprodotti della lavorazione

Nel processo di frantumazione le tre componenti del pneumatico, gomma, acciaio e fibra tessile, vengono separati con un grado di pulizia funzione della tipologia di lavorazione considerata. La presenza di scorie metalliche e tessili nel granulato di gomma dipendono dalla granulometria: si passa da un 90 % di purezza dei ciabattati fini (40 mm – 30 mm) a una purezza del 99 % per il polverino

I sottoprodotti che possono essere separati sono:

- **Acciaio armonico**: è un acciaio al silicio particolarmente ricco di carbonio (0,8-0,9 %) quindi definito come acciaio extraduro, di conseguenza poco comune e piuttosto pregiato. È un acciaio richiesto dalle acciaierie, ma il grado di purezza deve essere relativamente elevato altrimenti rischia di non aver collocamento sul mercato diventando così un "rifiuto" da smaltire.

- **Fibra tessile**: viene estratta dalla macinazione dei pneumatici, è un prodotto composto da fibra di viscosa, fibra acetata, poliammide e una percentuale marginale di residuo di gomma (attorno all'1%) .Il quantitativo ricavato dalla lavorazione è relativamente basso e il suo completo riutilizzo come materia

prima vergine prevede processi di elaborazione piuttosto complessi ed economicamente poco vantaggiosi, sono queste le problematiche che spingono a trascurare la fibra tessile in termini di business plan.

3.4 - Applicazioni dei materiali da PFU in ambito civile

Escludendo l'impiego di PFU interi, in ingegneria civile il trattamento dei pneumatici fuori uso prevede una prima riduzione volumetrica attraverso il processo di frantumazione o "ciabattatura", questo primo prodotto ottenuto, avente solitamente dimensioni comprese tra i 20 e 400 mm, può essere o utilizzato tal quale (ad esempio in processi di co-incenerimento in cementificio), oppure avviato all'ulteriore frammentazione per la produzione di granulati e polverini.

Il CEN (Comitato Europeo per la Standardizzazione) ha messo appunto una Specifica Tecnica riguardante i materiali prodotti da PFU, la TS 14243, sotto il coordinamento italiano dell'UNI.

I PFU possono essere utilizzati interi, oppure frantumanti in dimensione variabile a seconda della destinazione d'uso, la Tab. 4.1 riporta la distinzione che la Technical Specification 14243 prescrive, per i prodotti ottenibili a seconda della loro pezzatura.

Categoria	**Dimensioni min - max (mm)**
Taglio primario	> 300 mm
Ciabatta	20 - 400 mm
Cippato	15 -50
Granulato	0,8 - 20 mm
Polverino	< 0,8 mm
Acciaio	n.d.
Tessile	n.d.

Tab.3.1 - Categorie di prodotti da PFU – TS 14243

Si riportano di seguito le principali destinazioni d'uso dei materiali derivanti dal recupero dei Pneumatici Fuori Uso individuate a livello internazionale:

- Asfalti modificati (0-0,8 mm polverino e 0,8- 2 mm granulato)

Il polverino di gomma viene utilizzato in tutto il mondo per la produzione di asfalti modificati, l'aggiunta di gomma ai conglomerati bituminosi permette la realizzazione di pavimentazioni che sono molto apprezzate per durabilità, silenziosità ed aderenza.

- Superfici sportive (0,8 – 20 mm granulato deferrizzato)

I materiali ricavati da granulazione possono essere usati come materiale da intaso per i campi in erba artificiale e piste da atletica, pavimentazioni anti-trauma e superfici equestri. Le proprietà drenanti del materiale, unite alla capacità elastica di assorbire urti rendono il granulo di PFU particolarmente indicato, durante i giochi Olimpici invernali di Vancouver 2010 ad esempio, diverse superfici pubbliche sono state rivestite con materiali derivanti dalla gomma riciclata in particolare l'area "Live City".

- Materiale per l'isolamento (0 -20 mm granulato e polverino deferrizzato)

Il granulo di gomma legato con resine poliuretaniche, viene utilizzato per produrre pannelli insonorizzanti, tappetini anticalpestio, membrane impermeabilizzabili, materiali antivibranti e antisismici.

- Arredo urbano, pavimenti e manufatti (0 – 15 mm granulato e polverino)

Il granulo legato con resine poliuretaniche o in combinazione con altri polimeri termoplastici, viene utilizzato per la produzione di elementi di arredo urbano (dossi artificiali, cordoli etc..)

- Opere di Ingegneria Civile (PFU interi o 10 - 400 mm ciabattato e cippato)

I PFU interi sono talvolta utilizzati come elemento costruttivo di barriere insonorizzanti, barriere anti-erosione, stabilizzazione di pendii, protezione costiere, terrapieni etc.

Quelli frantumati invece sono utilizzati in sostituzione di inerti minerali per la realizzazione di fondazioni stradali/ferroviarie , rilevati stradali alleggeriti, le proprietà drenanti e il basso peso specifico ne rendono l'impiego particolarmente vantaggioso.

- Riutilizzo in mescola (0 – 0,4 mm polverino)

I polverini sono riciclati nelle nuove mescole per la produzione di articoli tecnici in quantità percentuali variabili in funzione delle prestazioni richieste al prodotto finale e, in minima parte, nelle mescole dei pneumatici.

- Materiale per pacciamature (10 – 50 mm cippato deferrizzato)

Il cippato rivestito con resine poliuretaniche e colorato in diverse tonalità ha trovato larga applicazione in sostituzione alla corteccia di conifere per la pacciamatura di giardini pubblici e privati, aiuole spartitraffico, rotatorie etc.

3.5 – Applicazioni del polverino in ambito stradale

Il polverino da PFU può essere incluso all'interno dei conglomerati bituminosi mediante due diverse tecnologie di produzione:

- La tecnologia "Wet", mediante la quale il polverino viene disperso all'interno del bitume, modificandone le caratteristiche viscoelastiche;
- La tecnologia "Dry", nella quale il polverino sostituisce una parte degli aggregati lapidei, modificando le caratteristiche del risultante scheletro litico e dando luogo ad una limitata interazione con il legante bituminoso.

In entrambi i casi le proprietà del prodotto composito sono estremamente influenzate oltre che dal dosaggio del polverino anche dalle sue caratteristiche fisico- chimiche, variabili in funzione del particolare processo di trattamento cui sono sottoposti i PFU.

3.5.1 – La tecnologia Wet

Nel caso di questa lavorazione la dispersione delle particelle di polverino avviene all'interno del bitume ad una temperatura di 175-225 °C, mediante accurata miscelazione meccanica.

A seconda del dosaggio e dal tipo di polverino impiegato, i leganti bituminosi prodotti con tale tecnologia possono essere distinti in due categorie, cui corrispondono ambiti di impiego differenti:

- Leganti ad alta viscosità("asphalt rubber");
- Leganti a bassa viscosità ("terminal blend").

I primi, vengono immediatamente dopo la miscelazione, mantenuti in agitazione ad una temperatura compresa tra 150 – 215 °C per circa 45-60 minuti, tempo necessario affinché possano verificarsi i fenomeni di interazione tra i due materiali. Questo tipo di leganti nella quale il polverino è riconoscibile anche nella matrice in cui è immerso sono denominati ad alta viscosità, in quanto ad una data temperatura (175 °C secondo le norme ASTM) posseggono una viscosità non inferiore a 1500cP. Generalmente contengono una percentuale di polverino pari al 15 % in peso del legante. Un'altra caratteristica discriminante è costituita dalla dimensione e dalla morfologia del polverino il quale deve essere di pezzatura fine e dalla forma irregolare, la norma ASRM D6114 impone un valore di soglia alla massima dimensione delle particelle (< 2,36 mm), segnalando che la granulometria del polverino deve essere concordata tra il produttore di legante e l'acquirente. Tale norma fissa inoltre i limiti relativi alla densità alla densità (1,15 ± 0,05), al contenuto d'acqua (≤ 0,75%) , di fibre tessili (≤0,5%) e di metalli ferrosi residui (≤0,01%).

I leganti che non raggiungono i valori di soglia di viscosità vengono nominati "terminal blends"

3.5.1.1 - Conglomerati bituminosi contenenti asphalt rubber

I conglomerati bituminosi "gap-graded" e "open- graded" rientrano rispettivamente nella categoria delle miscele di tipo "semi-chiuso" (vuoti residui dell'ordine del 5-8%) e "semi-aperto" (con vuoti dell'ordine del 12-18%). L'elevata percentuale di vuoti e la discontinuità granulometrica conferisce alle due tipologie di conglomerato un'elevata macrotessitura superficiale che conduce a valori elevati di aderenza anche in presenza di precipitazioni, quindi buone capacità drenanti e fonoassorbenti.

L'altro effetto della grossa granulometria è quella della buona resistenza delle stese al fenomeno dell'ormaiamento e della fatica grazie al riempimento della matrice litica principale con frazione fine e legante.

Le percentuali di legante ammesse sono del 7-9% per miscele "gap-graded"e del 8,5% per miscele "open graded".

3.5.1.2 – Conglomerati bituminosi contenenti terminal blends

Le miscele contenenti “terminal blends” sono caratterizzate da una distribuzione granulometrica continua degli aggregati, rientrando dunque nella categoria conglomerati bituminosi di tipo chiuso (vuoti residui del 4%). Il loro comportamento meccanico si discosta dalle miscele di tipo tradizionale a seconda del grado di modifica apportata al legante durante il processo di produzione.

In particolare, per effetto della variazione delle caratteristiche reologiche del legante stesso si rileva un aumento delle caratteristiche di risposta elastica sotto carico, con un conseguente miglioramento della resistenza all’accumulo di deformazioni permanenti e a fatica.

3.5.2 – La tecnologia Dry

Nel caso della tecnologia “Dry”, il polverino da PFU viene aggiunto presso l’impianto di produzione del conglomerato bituminoso come componente addizionale della miscela.

Non essendo prevista nessuna miscelazione preventiva con il bitume, vengono impiegati opportuni dosatori che introducono il polverino direttamente nella camera di miscelazione, avendo cura di indurre una dispersione sufficientemente omogenea all’interno della massa degli aggregati. Questo aspetto costituisce un punto critico in quanto il polverino presenta una densità significativamente inferiore a quella degli aggregati (1,15 g/cm^3) anziché circa (2,65g/cm^3), con la conseguente possibilità di dare luogo a fenomeni di segregazione. Il bitume aggiunto nel dosaggio desiderato, ricopre e lega entrambi i tipi di particelle (lapidei e di gomma), dando luogo ad una debole interazione superficiale con i granuli di polverino, il cui dosaggio è compreso tra l’1 ed il 3% in peso sulla miscela.

I polverini che possono essere utilizzati sono di differente pezzatura compresi tra quelli a grana grossa (passanti al setaccio da 6mm e trattenuti al setaccio da 2,36 mm) e quelli detti “ultrafini” (passanti al setaccio da 0,3 mm). Possono dunque realizzarsi sia miscele chiuse, semichiuse e semiaperte, facendo riferimento ai fusi con metodo “Wet”, mentre per quanto riguarda la percentuale di legante, questa dovrà essere definita, tenendo presente che il polverino tende ad assorbire, durante la fase di trasporto e messa in opera della miscela, una quota parte della frazione aromatica del bitume impiegato.

Nel caso di miscele chiuse invece per le caratteristiche di assorbimento qui sopra elencate, si raccomanda l'utilizzo di polverino ultrafine, per scongiurare fenomeni di sgranamento superficiale, vengono raccomandate generalmente anche le dimensioni dei granuli per le miscele "gap" e "open-graded" non superiori a 2mm.

Capitolo 4 – Riciclaggio a freddo

4.1 – Introduzione

Secondo l’ *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) l’Italia ha prodotto, nel solo 2006, 44.3 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso, come totale delle tecnologie “a caldo” e “a tiepido” (*hot* e *warm mix asphalt*), descrivendo negli ultimi anni una progressiva diminuzione, certamente influenzata dalla crisi economica mondiale, oltreché dall’implicito effetto di saturazione della rete con le opere di costruzione stesse.

Il nostro Paese attualmente si colloca al quinto posto, a quota 29 Mt, nella classifica europea di tale produzione relativa all’anno 2010 che vede in testa la Germania (45), seguita da Francia (38.8), Turchia (35.3) e Spagna (34.4). Nello stesso anno si sono generati 11 milioni di tonnellate di fresato (o RAP), subito dietro alla Germania capoclassifica con 14 Mt, con un suo reimpiego in applicazioni di *hot* e *warm recycling* pari al 20% (dati EAPA).

Tale dato è nettamente inferiore a quello riportato per altri paesi europei che, in certi casi riutilizzano l’80-100% del materiale prodotto [Asphalt in Figures 2010, *European Asphalt Pavement Association,* EAPA].

A tali dati deve affiancarsi quello dell’analisi delle modalità di manutenzione della rete stradale che, ad oggi, vede un deciso sbilanciamento verso la produzione di conglomerati bituminosi per strati superficiali, pari al 50% della produzione complessiva, rispetto ad un 30% per strati intermedi e solo un 20% per strati di base.
Altri Paesi europei privilegiano il rifacimento di strati profondi a differenza di quanto accade in Italia, ove la rete stradale è interessata, oramai da anni, da una carenza di manutenzione strutturale rafforzativa, necessaria per far fronte ai crescenti traffici ed all’invecchiamento della rete stessa. Gli effetti negativi che derivano dal quadro delineato sono da rilevare nell’ambiente soggetto al progressivo depauperamento delle risorse vergini ed al crescente inquinamento indotto sia dal conferimento in discarica di materiali non reimpiegati, sia dalle emissioni in atmosfera all’atto della produzione, del trasporto e della stesa dei conglomerati bituminosi.

A ciò si aggiungano gli effetti negativi per i gestori delle strade costretti, per mancanza di fondi e per mantenere condizioni di sicurezza accettabili, a privilegiare interventi di manutenzione superficiale degli strati bituminosi che, da soli, non risolvono le carenze strutturali delle sovrastrutture.

Allo stesso tempo anche le imprese costruttrici registrano difficoltà nel reperimento di aggregati e leganti di qualità a costi sostenibili ed, in molti casi, operano sfruttando solo una quota parte (40% circa) del proprio potenziale produttivo.

Il ricorso esteso a tecniche di riciclaggio quale strumento di manutenzione e di valorizzazione del patrimonio stradale trova, quindi, una più che ampia giustificazione soprattutto per quel che concerne la salvaguardia ambientale in termini di riduzione degli approvvigionamenti di materiali vergini e dei processi di conferimento in discarica gravosi, tra l'altro, anche in termini paesistici. Vi è poi la riduzione dei costi di produzione e l'incremento di quest'ultima favorita anche dall'eliminazione degli oneri di smaltimento dei materiali di risulta.

Appare chiaro dunque, come il fresato possa costituire una risorsa, soprattutto se affiancato a tecniche di riciclaggio a freddo le quali producono vantaggi in termini:

- Ambientali
    - Ridotta o nulla perdita di materiale della pavimentazione esistente, con percentuale di riutilizzo molto alta;
    - Bassa richiesta di energia nel riscaldamento o asciugatura dei materiali prima del trattamento;
    - Minima produzione di emissione per la produzione di miscele a freddo o stabilizzazione in relazione al HMA o riciclaggio a caldo. Sono possibili riduzioni fino al 45% in CO_2 e SO_2 e 60% in NO_x per miscele con temperature più basse di 38 °C (Hurley and Prowell, 2006).
- Sociali
    - Materiali stabilizzati a bitume (BMS) con bitume schiumato o emulsione di bitume quale legante possono essere stoccati e usati per lavori di manutenzione e migliorie;
    - Le condizioni di salute e sicurezza dei lavoratori sono migliori rispetto al HMA

- Il trattamento a passata singola durante il riciclaggio a freddo sul posto (CIR-Cold In Place Recycling) minimizza i conflitti dell'impianto con il traffico durante i lavori di riabilitazione, migliorando la sicurezza pubblica

- Economici
  - L'attrezzatura consente trattamenti più profondi degli strati in situ, riducendo lo spessore degli strati di usura
  - Il processo CIR consente la chiusura della corsia singola
  - Il processo CIR permette una veloce interruzione delle operazioni di riciclaggio in avverse condizioni meteorologiche, minimizzando il rischio dovuti all'umidità o la necessità di un ritrattamento

4.2 – Riciclaggio del fresato

I materiali non legati o granulari delle pavimentazioni flessibili, se confinati all'interno di uno stato compattato della pavimentazione, incrementano le loro caratteristiche effettive di rigidezza all'aumentare dello stato di sollecitazione. In questi materiali si possono formare deformazioni da taglio che accumulandosi si trasformano in deformazione permanente, nel caso in cui siano sottoposti a livelli di sollecitazione che rappresentano una frazione significativa della loro resistenza ultima. Per consentire al materiale legato di comportarsi più similmente ad una piastra viene aggiunto un agente stabilizzante, che lega le particelle di materiale tra loro e crea un materiale più resistente. La resistenza acquisita dal materiale dipende da:

- la quantità di stabilizzante aggiunta;
- la tipologia di materiale trattato.

In questa forma di riciclaggio è necessario verificare che non ci sia un contenuto eccessivo di sostanza stabilizzante, che andrebbe a ridurre le prestazioni dello strato.

Nonostante il bitume sia lo stesso legante sia nei conglomerati bituminosi a caldo (hot mix asphalt, HMA) che nei materiali stabilizzati a bitume (BMS), questi presentano caratteristiche molto differenti: un HMA è un materiale legato in modo continuo, ovvero il bitume costituisce una pellicola che ricopre tutte le particelle

dell’impasto, senza discontinuità, mentre per un BSM è vero il contrario, il bitume ricopre solo parzialmente gli aggregati.

Oggi le sostanze stabilizzanti sono usate in tutto il mondo per superare i limiti che tipicamente derivano dall’impasto dei materiali naturali e che vanno ad influenzare le prestazioni della pavimentazione. Le sostanze stabilizzanti, non solo migliorano le caratteristiche di resistenza di un materiale, ma ne aumentano anche la durata e la resistenza all’azione dell’acqua.

In molte parti del mondo, è praticamente impossibile reperire materiali da costruzione di buona qualità per la realizzazioni di pavimentazioni stradali, e i costi di trasporto per l’importazione di un materiale adeguato hanno favorito lo sviluppo di tecniche di stabilizzazione che permettono di utilizzare risorse disponibili in loco. La resistenza necessaria può spesso essere ottenuta applicando tecniche che prevedono l’utilizzo di un materiale di importanza secondaria, disponibile sul posto, a cui vengono addizionate piccole quantità di sostanze stabilizzanti aventi un costo relativamente basso. Queste tecniche sono applicabili sia ai processi di riciclaggio, sia in caso di realizzazione di nuove opere stradali. Aggiungendo una sostanza stabilizzante il materiale recuperato da una pavimentazione preesistente può essere rinnovato, evitando così di dover importare materiale nuovo per dare alla struttura della pavimentazione rigenerata la resistenza desiderata.

Le sostanze stabilizzanti attualmente utilizzate in tutto il mondo sono innumerevoli, la gamma comprende i composti chimici quali il cloruro di calcio, i polimeri a lunga catena e i prodotti sulfanati di petrolio, altri prodotti brevettati e le sostanze più comuni come il cemento. Tutte queste sostanze mirano al raggiungimento dello stesso obiettivo: legare insieme le singole particelle per aumentare la resistenza della superficie e/o renderla maggiormente resistente all’acqua. Alcune sostanze sono più efficaci di altre se impiegate con determinati materiali, altre ancora sono economicamente più convenienti; tutte però conservano il loro spazio sul mercato e molte di esse vengono utilizzate al meglio tramite l’impiego delle moderne riciclatrici. Oggigiorno vengono continuamente messi a punto nuovi prodotti ed è importante per il settore che questi vengano messi alla prova.

Le decisioni per stabilire la soluzione da adottare sono generalmente influenzate dai seguenti fattori:

-**prezzo**: il costo unitario della stabilizzazione resta il fattore principale;

-**reperibilità**: certe sostanze stabilizzanti potrebbero non essere disponibili ovunque;

- **caratteristiche del materiale**: alcune sostanze stabilizzanti sono più efficaci di altre se utilizzate con determinati materiali. Ad esempio la calce dovrebbe essere utilizzata al posto del cemento nel caso in cui si debbano stabilizzare terreni caratterizzati da un indice di plasticità particolarmente elevato.

4.2.1 – Sostanze stabilizzanti

La calce, il cemento e i composti ottenuti miscelando questi prodotti con cenere volante, scorie rocciose d'altoforno ed altre sostanze simili, rappresentano le sostanze cementizie stabilizzanti maggiormente utilizzate. Senza considerare la calce, già utilizzata dagli antichi Romani per i loro esperimenti, la sostanza che viene utilizzata da più lungo tempo è il cemento che per quanto ci è dato sapere è stato usato per la prima volta negli Stati Uniti, nel 1917, come sostanza stabilizzante convenzionale.

La funzione principale è quella di aumentare la resistenza e inoltre, la calce rilasciata durante il processo di idratazione, reagendo con le particelle di argilla presenti in un terreno plastico, ne riduce la plasticità. L'uso di miscele di cemento deve però essere limitato al trattamento di materiali con Indice di Plasticità inferiore a 10; è la calce a restare la migliore sostanza stabilizzante per la maggior parte delle materie plastiche.

La resistenza acquisita è principalmente determinata dalla quantità di sostanza stabilizzante aggiunta e dal tipo di materiale trattato, ma contrariamente a quanti alcuni ritengono, l'aggiunta di una quantità superiore di sostanza stabilizzante allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può ridurre le prestazioni dello strato.

Il materiale trattato con una sostanza stabilizzante cementizia tende ad essere mediamente friabile; aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più friabile e perciò lo strato stabilizzato sarà caratterizzato da una diminuzione delle proprie caratteristiche da fatica. In tale situazione, le continue sollecitazioni dovute

al carico esercitato dagli automezzi comportano inevitabilmente un aumento delle incrinature che, per lo strato di una pavimentazione stradale, rappresentano ovviamente una caratteristica negativa. E' quindi fondamentale che i requisiti di efficienza dello strato stabilizzato vengano chiaramente indicati e che venga condotto uno studio adeguato delle miscele su campioni rappresentativi allo scopo di determinare il corretto tasso di applicazione.

L'uso del bitume come sostanza stabilizzante, impiegato sia sottoforma di emulsione sia come bitume espanso, sta diventando sempre più diffuso, principalmente grazie ai progressi fatti in campo tecnologico. Quando il materiale viene stabilizzato con il bitume non è soggetto a incrinature da ritiro, tipiche dei materiali trattati con cemento. La superficie realizzata con materiale stabilizzato con bitume può essere immediatamente aperta al traffico grazie alla legatura iniziale delle particelle in superficie che impediscono lo sfondamento come conseguenza del passaggio del traffico. Se una superficie stabilizzata con bitume è correttamente finita può essere usata subito senza particolari problemi, ad eccezione dei mezzi pesanti, compresi i rulli compressori, che non devono essere parcheggiati sulla superficie completata per almeno una settimana, periodo durante il quale la superficie aumenta la propria resistenza.

Il trattamento con il bitume è un metodo conveniente per aumentare la resistenza di un materiale e per limitare le conseguenze dell'azione dell'acqua. Lo strato realizzato con materiale legato con bitume è flessibile e presenta caratteristiche di resistenza all'usura superiori alla media se paragonato agli strati trattati con sostanze stabilizzanti cementizie che permettono di ridurre lo spessore dello strato senza sacrificare la capacità strutturale.

Esistono due tipi molto diversi di processi di riciclaggio che prevedono l'impiego del bitume:

- il riciclaggio superficiale: durante questo tipo di operazione l'emulsione bituminosa è usata per rigenerare il vecchio strato di bitume sull'asfalto. Si tratta essenzialmente di un procedimento in sito di miscelatura a freddo dell'asfalto e non di un processo di stabilizzazione;

- un procedimento di stabilizzazione che prevede l'uso del bitume per stabilizzare il materiale riciclato. Normalmente, questo procedimento può essere applicato nei punti in cui lo spessore dello strato è superiore ai 100 mm.

E' importante capire che il riciclaggio in profondità con una sostanza stabilizzante bituminosa crea un materiale stabilizzato con bitume e non una sostanza simile all'asfalto. Una base di asfalto avrà un contenuto di vuoti pari a circa il 4%. Contrariamente all'asfalto artificiale, la gradazione ottenuta dal materiale riciclato dipende, in particolar modo, dal tipo di materiale che costituisce la struttura della pavimentazione preesistente. Il materiale stabilizzato con bitume ha solitamente un contenuto di vuoti compreso tra il 10 e il 20% e tende a comportarsi in parte come un materiale granulare, in grado di sopportare la sollecitazione di rottura a compressione dovuta alla frizione intergranulare, e in parte come un materiale viscoelastico che può sopportare sforzi di tensione ripetuti. Si tratta quindi di un ibrido.

4.2.2 – Stabilizzazione con Emulsione Bituminosa

Le emulsioni bituminose sono state originariamente sviluppate per superare le difficoltà tipiche delle lavorazioni che prevedono l'impiego di bitume a caldo e per realizzare a temperatura ambiente miscele con materiale umido.

Un'emulsione è composta da due liquidi immiscibili, uno disperso nell'altro sotto forma di goccioline o di piccoli globuli. Scientificamente, un'emulsione è un sistema eterogeneo termodinamicamente instabile, che include almeno due fasi, delle quali una (il bitume) è dispersa nell'altra (acqua). Per disperdere il bitume è necessario utilizzare energia meccanica di taglio e un agente tensioattivo o emulsionante, ovvero sostanze che hanno la proprietà di abbassare la tensione superficiale di un liquido. La maggior parte delle emulsioni usate come sostanze stabilizzanti hanno una componente di "residuo di bitume" del 60%; ciò significa che il 60% del volume dell'emulsione è composto da bitume disperso nel 40% del volume di acqua.

Dopo aver realizzato la miscela con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si accorpano formando una pellicola ininterrotta che si deposita

sulla superficie dell’aggregato. Si dice comunemente che l’aggregato “rompe”; questo fenomeno è provocato da:

- perdita di acqua attraverso l’evaporazione o l’assorbimento da parte del materiale che viene miscelato;

- coagulazione chimica dovuta ad un processo di reazione tra l’emulsione e l’aggregato;

- disturbi meccanici provocati da eccessive pressioni di pompaggio, processi di miscelatura e sforzo di costipamento;

- composizione chimica dell’emulsione.

La velocità di rottura può essere definita analiticamente come “Indice di rottura” e rappresenta la capacità dell’emulsione di impastare una quantità ben definita di fini standard (polveri silicee). Più è basso il quantitativo di polveri che danno origine ad un impasto legato, più l’emulsione viene considerata “rapida”.

Normalmente il cemento viene utilizzato assieme all’emulsione bituminosa, in quanto oltre ad aumentare la capacità di mantenimento della resistenza, il cemento agisce come una specie di catalizzatore aumentando le originali caratteristiche di resistenza. Una ricerca condotta per studiare gli effetti della miscelatura del cemento ad una emulsione bituminosa ha dimostrato che si può addizionare una quantità di cemento pari al 2% per massa senza che vengano ridotte significativamente le caratteristiche da fatica dello strato stabilizzato.

Esistono due tipi di emulsioni bituminose: anioniche e cationiche. La differenza fondamentale tra queste è il carico di bitume sospeso sugli ioni e la “fase” di sospensione. Le particelle di bitume in un’emulsione anionica hanno una carica negativa in una fase alcalina, mentre le emulsioni cationiche hanno delle particelle di bitume con carica positiva in fase acida. Prodotti stabilizzanti vengono aggiunti in entrambi i tipi di emulsione, per prolungare il tempo di rottura, riducendo in maniera considerevole l’entità della carica sulle particelle di bitume verso l’aggregato.

Un’emulsione anionica si rompe solo quando l’acqua che contiene il bitume in sospensione evapora o viene assorbita dall’aggregato o dal cemento. Le emulsioni cationiche si rompono invece chimicamente, ciò implica che vengono aggiunti

durante il processo di produzione particolari prodotti chimici in grado di provocare la separazione del bitume dall'acqua dopo un determinato periodo di tempo.

L'unica ragione per cui si utilizza il bitume emulsionante come sostanza stabilizzante è che esso permette di miscelare il bitume con materiali freddi e umidi.

4.2.3 – Stabilizzazione con Bitume Espanso

L'espansione si forma quando piccole particelle di acqua vengono a contatto con il bitume a caldo; la superficie complessiva aumenta e la viscosità del bitume viene sensibilmente ridotta. Il bitume diventa allora particolarmente adatto per essere miscelato con un aggregato freddo e umido.

Il bitume espanso può essere utilizzato come sostanza stabilizzante con molti materiali: dal pietrisco di buona qualità alla ghiaia più scadente con una plasticità relativamente alta. I principali vantaggi della stabilizzazione ottenuta con il bitume espanso, piuttosto che con l'emulsione bituminosa, sono i seguenti:

- riduzione dei costi sostenuti per il legante e il suo trasporto; questo perché non bisogna sostenere alcun costo di produzione;
- subito dopo aver ultimato la miscela utilizzando il bitume espanso, il materiale ottenuto può essere posto in opera e costipato;
- il materiale trattato con bitume espanso rimane lavorabile per lunghi periodi.

I principali fattori che determinano l'impiego del bitume espanso come sostanza stabilizzante sono:

- **caratteristiche di espansione**: le caratteristiche del bitume espanso sono il rapporto di espansione e il tempo di semitrasformazione. Il rapporto di espansione è il rapporto tra il volume massimo del bitume allo stato espanso e allo stato non espanso. Il tempo di semitrasformazione corrisponde al tempo, misurato in minuti secondi, che la schiuma impiega a depositarsi fino a raggiungere metà del volume massimo ottenuto. Le caratteristiche di espansione più importanti sono: la temperatura del bitume, la quantità d'acqua addizionata al bitume, la pressione di iniezione del bitume nella camera di espansione, la presenza di sostanze antischiuma come i compositi di silicio. Generalmente la schiuma migliore è

quella che riesce ad ottimizzare sia l'espansione che il tempo di semitrasformazione;

- **indice di bitume e reologia**: i bitumi più morbidi presentano generalmente delle caratteristiche schiumogene migliori. I bitumi più duri vengono utilizzati preferibilmente in condizioni climatiche caratterizzate da temperature elevate;

- **dispersione del bitume**: contrariamente all'asfalto caldo, il materiale stabilizzato con il bitume espanso non è di colore nero. Questo succede perché le particelle più grosse di aggregato non sono ricoperte e sono solitamente prive di bitume.

CEMENTO	
Vantaggi	Svantaggi
• reperibilità; • costo: è molto più conveniente rispetto il bitume; • facilità di applicazione;	• le incrinature del ritiro sono inevitabili; • aumento della rigidità che riduce le caratteristiche di resistenza a fatica; • richiede manutenzione adeguata.

EMULSIONE BITUMINOSA	
Vantaggi	Svantaggi
• pavimentazione flessibile, la stabilizzazione con emulsione genera un materiale elastico e viscoso con caratteristiche a fatica superiori alla media; • facilità di applicazione;	• costo, normalmente non sono fabbricate in loco; • il contenuto di umidità del materiale nella pavimentazione preesistente a volte è eccessivamente elevato e si satura con l'aggiunta di emulsione;

BITUME ESPANSO	
Vantaggi	Svantaggi
• facilità di applicazione; • pavimentazione flessibile; • il materiale può sopportare il carico del traffico subito dopo la posa.	• il processo di espansione richiede un bitume molto caldo (170°C) e sono necessarie attrezzature specifiche; • la qualità del materiale stabilizzato è strettamente connessa alle caratteristiche del bitume.

Fig.4.1 – Vantaggi /svantaggi per tipologia di legante

4.3 – Il processo di riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo può avvenire in impianto, se il materiale recuperato da una strada esistente, viene trasportato a un deposito centralizzato, per essere rigenerato da un impianto fisso, oppure in sito, se si utilizza una macchina riciclatrice. Il riciclaggio in impianto fisso il più delle volte rappresenta la soluzione più onerosa in termini di costo per metro cubo di materiale rigenerato, soprattutto perché si deve sostenere il costo del trasporto, che non è presente se il materiale viene riciclato in sito.

La scelta del metodo più idoneo agli interventi da eseguire è dettata dai seguenti fattori:

- **la tipologia di costruzione**: normalmente la rigenerazione in impianto fisso viene utilizzata nei casi in cui il materiale riciclato deve essere utilizzato per la costruzione di un nuovo strato della pavimentazione;

- **il materiale presente in sito**: la variabilità e le condizioni del materiale nella pavimentazione esistente da riciclare condizionano la scelta del trattamento.

4.3.1 – Riciclaggio in impianto

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso, può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri; possono anche essere utilizzati impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati. La scelta di rigenerazione in impianto fisso è dettata dalla necessità di recuperare tutto il fresato preventivamente accumulato presso cantieri o depositi temporanei. Questi impianti permettono un ottimo controllo del dosaggio del fresato e del materiale d’integrazione; lo stesso dicasi per i leganti idraulici e quelli di base bituminosa. Inoltre al fine di ottenere le caratteristiche di progetto previste è possibile variare i componenti in relazione al mutare del materiale fresato (granulometria, percentuale di bitume, umidità…).

I principali vantaggi offerti dal confezionamento delle miscele in un impianto fisso risultano essere i seguenti:

- **Controllo dei materiali aggiuntivi**: confezionando le miscele in un impianto fisso centralizzato si può ottenere un prodotto finale conforme a specifici requisiti aggiungendovi diversi tipi di aggregato.

I materiali che vengono aggiunti possono essere stoccati e testati prima della miscelazione e le loro percentuali possono essere modificate in relazione alle esigenze.

- **Qualità di miscelazione**: si possono impostare una serie di parametri operativi del mescolatore forzato per variare opportunamente il tempo che il materiale trascorre nel vano di miscelazione, in questo modo c'è la possibilità di modificare la qualità della miscela.

- **Stoccabilità**: soprattutto nel caso in cui il materiale sia trattato con bitume schiumato il prodotto miscelato può essere usato nel momento in cui è richiesto.

Gli impianti per il riciclaggio appartengono a due tipi di categorie:

- impianti specifici fissi, nati esplicitamente per il riciclaggio a freddo;
- impianti atti a produrre del misto cementato da 100-150 t/h a funzionamento continuo opportunamente modificati.

In entrambi i casi l'impianto è composto da:

- un sistema di frantumazione e riselezione del fresato;
- due o più predosatori per il fresato e per il aggregati di integrazione;
- un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- un mescolare di tipo continuo a due alberi;
- rampa per l'emulsione;
- attrezzature e strumenti di controllo e dosaggio;
- un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro.

Questi impianti possono essere discontinui o continui. La differenza fondamentale è rappresentata dalla modalità di dosaggio degli inerti e del legante; nel primo caso il ciclo sarà per l'appunto discontinuo, poiché il materiale verrà pesato e raggiunto un determinato quantitativo, verrà inviato nel ciclo produttivo. La produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso. Nel secondo caso, invece, l'alimentazione dell'impianto avverrà in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minore precisione del dosaggio dei materiali.

I materiali che compongono le miscele nel riciclaggio a freddo sono:

- materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- legante bituminoso sotto forma di emulsione bituminosa o schiuma bitume;
- additivi;
- acqua di aggiunta, per migliorare la lavorabilità;
- aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero.

La prima procedura da eseguire, prima ancora dell'ingresso nell'impianto, riguarda la preparazione del fresato. È necessario controllare le pezzature, le impurità e l'umidità. Quando il materiale entra nell'impianto è sottoposto inizialmente a un processo di frantumazione e riselezionatura del fresato.

La riduzione dimensionale è molto importante per svariate ragioni: la lavorabilità del materiale si traduce spesso in requisiti di palabilità, cioè buona capacità di un materiale di essere trasportato; la riduzione dimensionale, assieme a svariate altre caratteristiche di forma e assortimento del materiale, assicura una capacità maggiore di compattazione da parte dell'operatore durante un uso successivo del materiale, poter abbassare il più possibile l'indice dei vuoti, è garanzia di maggiore stabilità futura.

Fig.4.2 – Impianto di riciclaggio a freddo

La riduzione dimensionale opera creando inevitabilmente assortimento del materiale: un buon assortimento interviene nell'abbassamento dell'indice dei vuoti. I frantoi possono essere fissi dove una pala gommata carica il materiale dai cumuli in ingresso e alimenta direttamente il frantoio, o mobili ai quali sono riservate funzioni più specifiche. Per la preventiva parziale frantumazione di blocchi di dimensioni troppo grandi ci si serve di un escavatore munito di martello demolitore.

Fig.4.3 – Frantumazione del fresato in impianto

Avvenuta la frantumazione e la successiva riselezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono coinvolti al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori. I mescolatori sono costituiti generalmente da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato. La miscelazione si ottiene per l'azione di alberi paralleli rotanti a 30-80 giri/mm. Le pareti interne del miscelatore, come pure i componenti rotanti, sono di acciaio al manganese dovendo resistere alla violenta azione dell'usura causata dal mescolamento. La miscelazione è effettuata assieme al legante che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3% al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler. I possibili additivi possono essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, aggiunto in percentuali che vanno dall'1 al 3%, la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza, e di essere un catalizzatore per favorire la rottura nel caso dell'emulsione. Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito, in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo cosi la pavimentazione originaria.

4.3.2 - Riciclaggio in sito

Le macchine riciclatrici sono frese a freddo modificate o stabilizzatrici adattate che si sono evolute nel tempo. Progettate specificamente per essere in grado di riciclare in una sola passata strati di pavimentazione di grande spessore, le moderne riciclatrici sono di norma macchine grandi ad elevate prestazioni, montate su cingoli o su grosse ruote gommate.

Le modalità di riciclaggio a freddo maggiormente utilizzate sono:

- con bitume schiumato e cemento;
- con emulsione bituminosa e cemento.

Un rotore di fresatura e miscelazione impasta il fresato nel vano di miscelazione, amalgamandovi cemento o calce oppure entrambi. I leganti sono sparsi sul terreno

attraverso un carrello spanditore, e infine una lama raschiatrice precaricata spiana su tutta la larghezza il terreno mescolato omogeneamente con il legante.

Il “cuore” della macchina è il rotore di fresatura e miscelazione che garantisce la comminuzione del materiale di pezzatura grossolana e una miscelazione vigorosa e omogenea anche di terre pesanti. Di norma tale rotore ruota in senso opposto a quello di marcia, polverizzando il materiale della pavimentazione esistente; inoltre in base al tipo di intervento è possibile regolare il volume della camera di fresatura a seconda del volume di materiale che è necessario trattare. (Fig. 4.5)

Fig.4.4 – “Denti” di una comune fresatrice

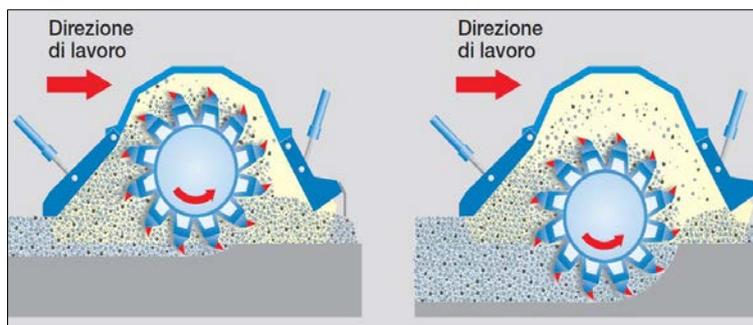



Fig.4.5 – Direzione avanzamento macchina fresatura a miscelazione

Mentre la macchina avanza con il rullo di fresatura rotante, l’acqua, contenuta in autobotte collegata alla riciclatrice, viene erogata mediante un tubo flessibile e spruzzata all’interno del vano di miscelazione della riciclatrice. La quantità dell’acqua viene dosata con precisione tramite un impianto di pompaggio controllato da microprocessore, ed il rullo rotante mescola accuratamente l’acqua con il materiale riciclato, onde ottenere il tenore di umidità necessario per raggiungere elevati gradi di costipamento. In modo simile possono essere iniettati direttamente nel vano di miscelazione anche dei leganti liquidi, quali una boiacca cementizia o un’emulsione bituminosa, sia singolarmente che insieme. Inoltre è possibile iniettare nel vano di miscelazione pure del bitume schiumato mediante una separata barra

spruzzatrice appositamente progettata. I leganti in polvere, quali ad esempio la calce idrata o cemento, vengono normalmente sparsi sulla pavimentazione esistente, nel tratto antistante la riciclatrice. Quest'ultima passando al di sopra, provvede alla miscelazione in un'unica passata, della polvere con il materiale fresato e l'acqua iniettata (Fig. 4.6).

Nella tecnica con bitume schiumato, come negli impianti fissi, il bitume caldo portato a 160°C - 180°C viene messo a contatto con acqua a temperatura ambiente in una camera di espansione; in questo modo si genera vapore che causa un aumento di volume del legante con formazione di schiuma di bitume che ne incrementa la superficie specifica e conferendo maggior lavorabilità con inerti freddi e umidi. Successivamente vengono incorporati bitume espanso (3-5% della massa dell'inerte),cemento e acqua al materiale fresato e si effettua una miscelazione estremamente rapida che tiene conto del tempo di decadimento della schiuma di bitume. La miscela riciclata viene immediatamente posta in opera e compattata.

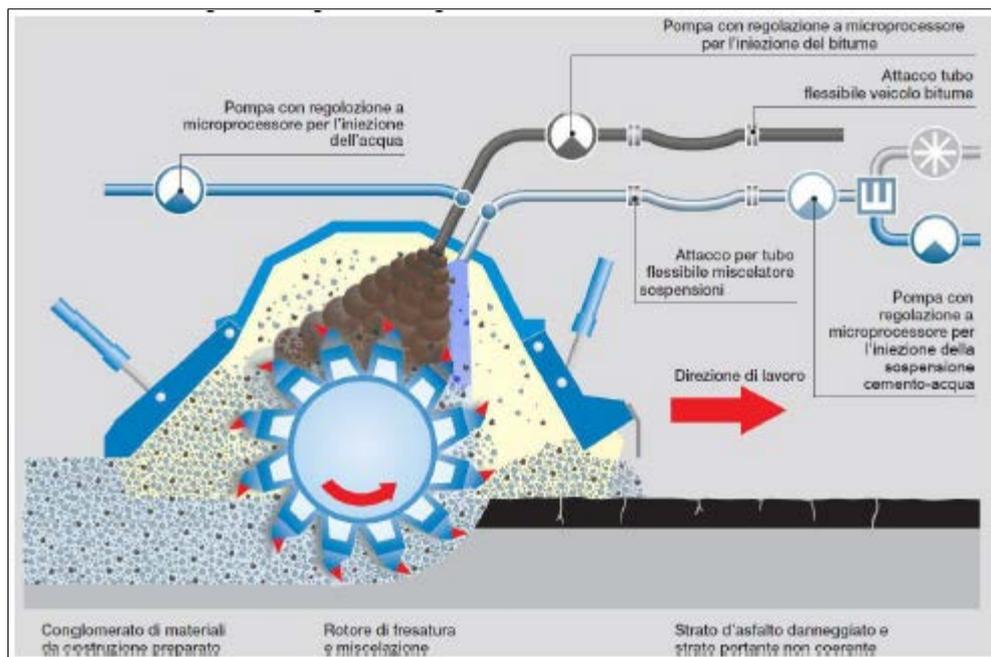



Fig.4. 6 – Processo di riciclaggio a freddo

.I principali vantaggi della tipologia di riciclaggio con bitume schiumato sono:

- minimo inquinamento atmosferico;
- minor invecchiamento del legante;
- minori problemi di compattazione e di umidità con la schiuma;
- posa in opera anche con condizioni climatiche non ottimali.

Gli svantaggi, si contro, possono essere:

- scarsa esperienza sul confezionamento della miscela:
- aggiunta di antischiumanti durante il processo di raffinazione ;
- necessità di disporre di bitume caldo.

Nella tecnica con emulsione bituminosa si additiva al fresato un'emulsione che assicura coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato. Le emulsioni sono presenti nel con conglomerato con una percentuale del 5% rispetto alla massa degli inerti.

I vantaggi di questa tipologia di riciclaggio sono:

- facile reperibilità delle emulsioni;
- facilità di applicazione;
- ridotte fessurazioni;
- conglomerato resistente all'umidità.

Gli svantaggi principali sono invece:

- trattamento più costoso;
- trattamento problematico con elevata umidità, si può verificare il rigonfiamento dello strato riciclato;
- la temperatura di stesa deve essere superiore a 10°C.

Un treno di riciclaggio (Fig.4.7) è costituito da un insieme di macchine operatrici semoventi, che possono differenziarsi in base al tipo di macchinari utilizzati e in funzione della modalità previste per l'intervento; per esempio nel caso di riciclaggio con bitume schiumato, sarà composto da:

- fresatrice-riciclatrice;
- mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento e spandicemento);
- autocisterna contenente bitume a caldo;
- autocisterna per il rifornimento di acqua (di solito posta davanti alla riciclatrice);
- rullo vibrante per la compattazione.

Generalmente la cisterna d'acqua è presente quando si effettua il riciclaggio con bitume schiumato, e in tutti i casi in cui ci sia anche o solo la presenza di una sostanza stabilizzante cementizia: bitume schiumato e cemento/calce, emulsione bituminosa e cemento/calce, solo cemento; tuttavia può anche essere presente in tutti quei casi che richiedano acqua di aggiunta per migliorare la lavorabilità della miscela. La cisterna del bitume e dell'emulsione, sono specifiche invece del riciclaggio con sostante stabilizzanti bituminose, con o senza cemento.

La prima macchina è generalmente la fresa, che lavora alla profondità prevista dall'intervento; il fresato viene quindi caricato dalla macchina che segue, impastato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e additivi, per poi essere steso e compattato.

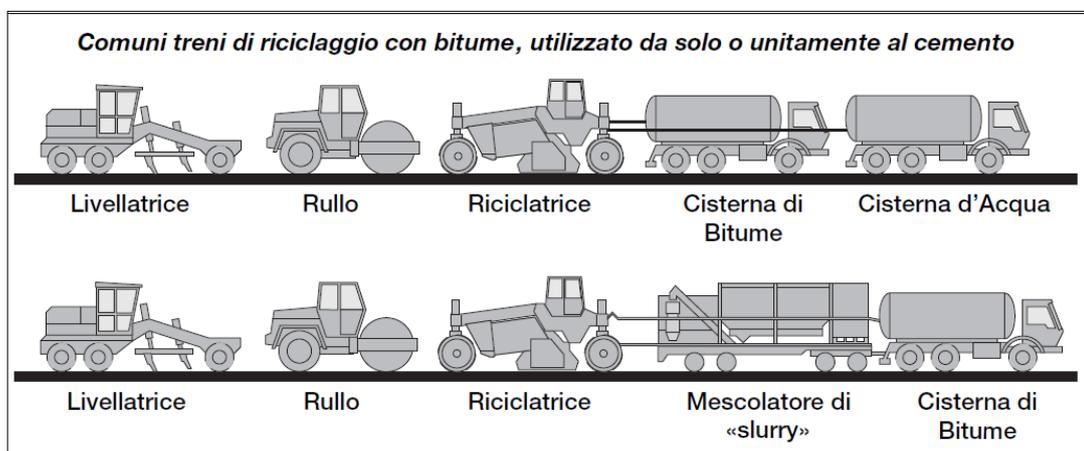



Fig.4. 7 – Comuni treni di riciclaggio

Nel corso degli anni si è poi passati dalle frese e dalle stabilizzatrici alle attuali riciclatrici specializzate: si parla in questo caso di sistema single unit, nel quale la miscelazione del nuovo conglomerato riciclato avviene nella stessa unità nella quale avviene la fresatura, che si differenzia dal sistema multi train, nel quale invece la fresatrice e la mescolatrice sono due unità distinte. In particolare in quest’ultima tipologia, la pavimentazione viene prima demolita e successivamente accumulata sotto il treno di riciclaggio, sotto forma di cordolo continuo lungo l’asse stradale, che verrà raccolto dalla mescolatrice che segue: questa macchina è provvista nella parte anteriore di un nastro trasportatore, che permette di convogliare il materiale per una ulteriore frantumazione ed una successiva vagliatura, arrivando infine al mescolatore insieme al legante e agli additivi.

Fig.4. 8 - Foto di un treno di riciclaggio CMT 250 della MARINI (Pavimental Autostrade spa)

Il materiale uscente dalla riciclatrice viene precompattato da un rullo vibrante pesante per ottenere un grado di addensamento uniforme in tutto il materiale riciclato. Di seguito, il materiale viene profilato da una motolivellatrice prima di essere costipato da rulli vibranti e rulli gommati. Nel caso in cui si usi un’emulsione bituminosa o bitume schiumato insieme ad una boiacca cementizia, il treno di riciclaggio avrà una configurazione simile: un’autocisterna di bitume viene posizionata davanti al miscelatore di sospensioni, dal quale viene spinta. Qualora il cemento venga sparso in forma pulverulenta sulla superficie stradale antistante il treno di riciclaggio, la cisterna di bitume è agganciata direttamente alla riciclatrice, e in testa al treno spinto viene posta un’autobotte d’acqua che funge da veicolo capofila.

Capitolo 5 – Programma Sperimentale

5.1 – Introduzione

L’obbiettivo della ricerca è quello di valutare la possibilità di inserimento del polverino di gomma all’interno di un misto cementato, confezionato a freddo, composto da emulsione bituminosa, cemento e fresato.

Lo studio fornisce gli effetti indotti dall’aggiunta di polverino di gomma sulla miscela a parità di granulometria, emulsione e cemento, in termini di caratteristiche meccaniche quali: Lavorabilità, Resistenza a Trazione Indiretta e Moduli di Rigidezza.

Va detto inoltre come il suddetto oggetto di ricerca, vada inquadrato in ottica ecosostenibile e soprattutto innovativa, dati i pochi studi tecnici e sperimentali, sull’impiego del polverino di gomma in conglomerati bituminosi e soprattutto, come nel caso in analisi, nei misti cementati riciclati a freddo.

5.2 – Articolazione del programma

La sperimentazione è stata sviluppata in sito e in laboratorio. Presso il campo prove Lungosavena sono state effettuate: stesa del materiale (con polverino e non), confezionamento tramite pressa giratoria dei provini (con laboratorio mobile) e controllo della omogeneità di stesa. Presso il laboratorio *DICAM – Strade* sono stati confezionati *i* provini tramite pressa giratoria ed analizzate le caratteristiche meccaniche della miscela (Trazione Indiretta e ITSM).

In generale è possibile riassumere la ricerca in 5 fasi principali :

1) *Descrizione del programma sperimentale* : descrizione del campo prova e delle fasi di realizzazione e del progetto;
2) *Fase di prequalifica* : descrizione dei materiali impiegati e Mix Design;
3) *Controllo della lavorazione in opera* : studio sull’ addensabilità delle miscele in opera;
4) *Caratterizzazione meccanica del materiale steso* : analisi e descrizione dei risultati dei provini sottoposti a ITS e ITSM;
5) *Valutazione dell’omogeneità di stesa*: prove con LWD;

5.3- Descrizione del progetto e del campo prove

Il campo prove è localizzato in prossimità della nuova rotatoria sud della Lungosavena, nel comune di Castenaso della provincia di Bologna. La porzione interessata dall'intervento è quella riguardante un bypass di una rotatoria (Fig.5.1) di circa 120 m, per una larghezza di 6 m e spessore 0,2 m.

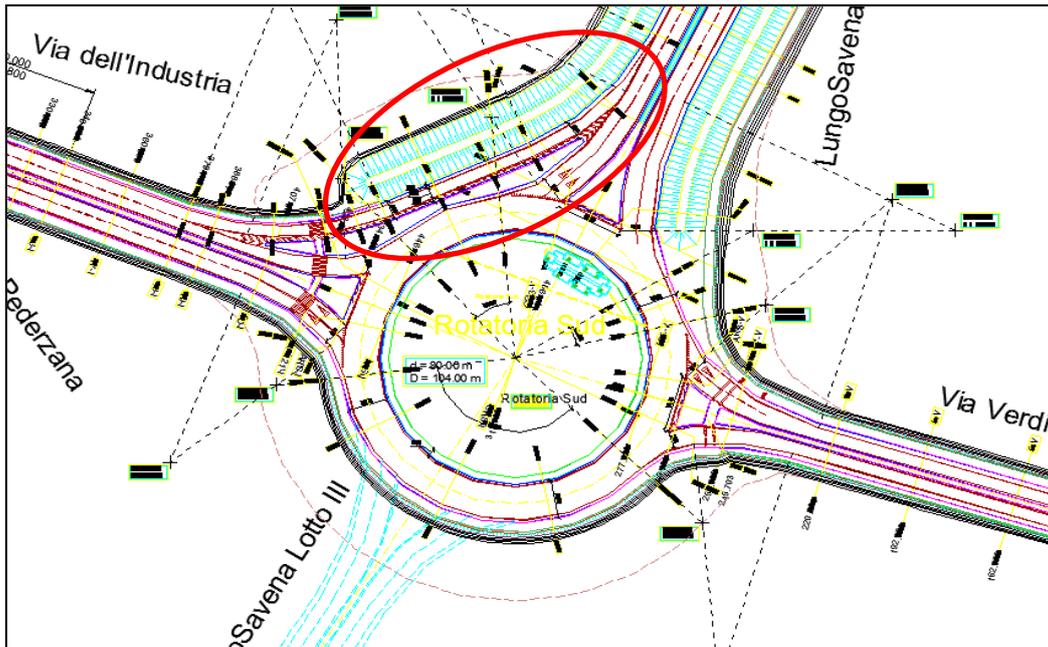



Fig.5.1 - Inquadramento campo prova

Lo scopo è quello di verificare come e se il polverino di gomma sia in grado di conferire alla miscela dei benefici, tipo: prolungamento della vita utile, migliore capacità di addensamento etc. Per questa motivazione 40 m dei 120 a disposizione sono stati realizzati con un misto cementato privo di polverino, in maniera tale da avere un metro di paragone.

La stesa di 120 m è così composta (Fig. 5.2):

- 80 m di misto cementato ad alta flessibilità con emulsione bituminosa e polverino;
- 40 m di misto cementato ad alta flessibilità con emulsione bituminosa;

Fig.5.2 - Schema campo prova

Al seguito di uno studio preliminare in laboratorio, che verrà riportato nel paragrafo successivo, è stata effettuata la stesa del misto cementato ad alta flessibilità con il 3% di emulsione bituminosa, il 3,5% di cemento e l' 1,5% di polverino il cui dosaggio è frutto dell'esperienza pratica e di numerosi studi, secondo cui la percentuale di integrazione si aggira tra l' 1% e il 5% volume, sulla miscela di aggregati.

Le due miscele sono così composte:

- **Misto Cementato con polverino:** Cemento 3,5% - Emulsione Bituminosa 3%- Polverino o PFU 1,5% (in volume);
- **Misto Cementato senza polverino:** Cemento 3,5% - Emulsione Bituminosa 3% - Polverino 0% (in volume);

Una volta definite le caratteristiche delle due miscele si è proceduto con la stesa del materiale (Fig.5.3 e Fig. 5.4) articolata in 8 step:

1) Passaggio del Rullo Intelligente Bomag al fine d valutare l'omogeneità del piano di posa;
2) Arrivo della miscela in sito confezionata con polverino e acqua precedentemente, presso lo stabilimento di Spilamberto da Frantoio Fondovalle;
3) Sistemazione del materiale sul piano di posa con Grader per una larghezza trasversale di circa 6 m (sezione finale prevista);
4) Spargimento del cemento sulla superficie e lavorazione dello stesso per mezzo di spandicalce, al fine di garantire il corretto dosaggio in peso sugli inerti pari al 3,5%;

Fig.5.3 - Prime 4 fasi di messa in opera

5) Confezionamento della miscela con emulsione con utilizzo della riciclatrice Wirtgen W2000 la quale è in grado di "rimescolare" il materiale sparso sul piano di posa , garantendo un'omogena distribuzione volumetrica dei leganti, del fresato e del polverino.

6) Risistemazione delle quote di progetto sulla larghezza della sezione di 6 m, sempre con l'ausilio del Grader e conferimento di un primo stato di addensamento con rullo ferro-ferro da 20 t;
7) Raggiungimento del grado di addensamento ottimale per mezzo di un rullo gommato da 20 t e pressione di gonfiaggio di 9 atm e verifica dello stesso sempre con Rullo Intelligente Bomag;
8) Stesa di un velo di emulsione bituminosa a lavoro ultimato con lo scopo di "siggillare" lo strato finito;

Fig.5.4 - Ultime 4 fasi della lavorazione

Le operazioni precedentemente elencate sono state le medesime sia per la sezione di 80 m nella quale è stato steso il Misto Cementato ad Elevata Flessibilità con polverino, sia per i 40 m di stesa senza.

5.4 – Prequalifica del materiale

La fase di prequalifica riguarda lo studio del comportamento del materiale in laboratorio, prima che questo venga steso. Vengono valutate in questa fase, quelle che sono le caratteristiche di addensamento e di resistenza della miscela, che dovranno essere in linea con i rifermenti forniti dal capitolato di riferimento. Quello che ci si auspica, è che tali valori sia rispettati tanto in laboratorio quanto in sito, tenendo sempre bene in considerazione che, nella fase di stesa le condizioni al contorno possono essere molteplici.

Anche in questo caso è possibile individuare due fasi salienti:

1. **Analisi del materiale e Mix Design :**
    - I materiali;
    - Mix Design;
2. **Confezionamento, Compattazione e Trazione Indiretta:**
    - Lavorabilità e Compattazione con Pressa Giratoria;
    - Maturazione a 40°C per 72 ore;
    - Trazione indiretta a 25 °C

Nella prima fase verranno analizzati uno ad uno i materiali facenti parti delle miscela e le loro percentuali in peso, ai fini del confezionamento della miscela finale. Nella seconda invece verrà studiato l’addensamento delle suddette miscele, con l’ausilio delle Pressa Giratoria e una volta sottoposti a maturazione, il loro comportamento in termini di resistenza meccanica.

5.4.1 – I materiali

5.4.1.1- Inerti Vergini del frantoio Fondovalle

Gli Inerti Vergini Frantoio Fondovalle sono costituiti da elementi sani, duri di forma poliedrica, puliti, esenti da polveri o materiale estranei. Questi sono provenienti dalla frantumazione di rocce di natura alluvionale del bacino fluviale della zona di Spilimberto (Tab.5.1).

Granulato Grosso 20-32		*Stabilizzato Fine 0-20*		*Sabbia*	
Setaccio (mm)	*Passante (%)*	*Setaccio (mm)*	*Passante (%)*	*Setaccio (mm)*	*Passante (%)*
31.5	100.00	*31.5*	100.00	*31.5*	100.00
20	26.20	*20*	99.00	*20*	100.00
16	1.00	*16*	93.10	*16*	100.00
10	0.10	*10*	67.80	*10*	100.00
6.3	0.10	*6.3*	50.90	*6.3*	100.00
4	0.10	*4*	39.70	*4*	95.00
2	0.10	*2*	31.20	*2*	75.00
0.5	0.10	*0.5*	21.00	*0.5*	38.00
0.25	0.10	*0.25*	18.10	*0.25*	20.40
0.063	0.10	*0.063*	11.50	*0.063*	2.50

Tab.5.1- Rappresentazione delle tre pezzature in termini di apertura dei setacci / % di passante

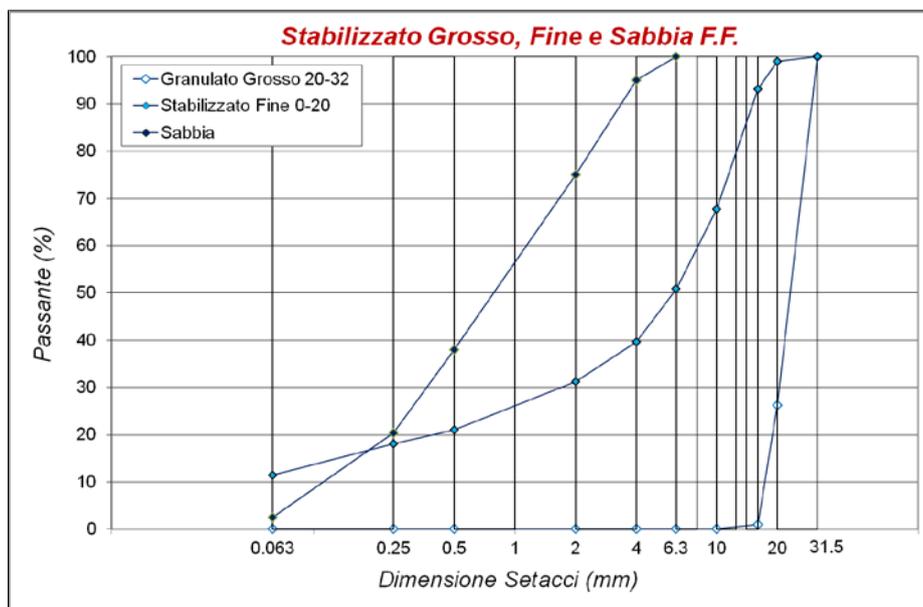



Fig.5.5 - Curva granulometrica delle tre pezzature

5.4.1.2- Inerti Riciclati: Fresato 0-20 e Fresato 0-10

L'aggregato Riciclato è costituito interamente da Fresato o Reclaimed Asphalt Pavement (100% RAP), materiale proveniente da scarifica di pavimentazioni in conglomerato bituminoso, con distribuzione granulometrica degli aggregati valutata vagliando gli stessi negli appositi setacci, definiti dalla normativa UNI EN 933-1, prima e dopo l'estrazione del bitume. Le pezzature considerate sono lo 0-20 e lo 0-10 (Tab.5.2 e 5.3).

Fresato 0-20		***Fresato 0-20 (dopo estrazione)***	
Setaccio (mm)	***Passante (%)***	***Setaccio (mm)***	***Passante (%)***
31.5	100.00	***31.5***	100.00
20	92.40	***20***	98.05
16	84.28	***16***	93.27
14	72.85	***14***	87.39
12.5	60.87	***12.5***	81.54
10	36.91	***10***	59.65
8	18.01	***8***	41.39
6.3	12.02	***6.3***	34.82
4	7.35	***4***	28.19
2	3.87	***2***	21.77

Tab.5.2 - % Passante 0-20 prima e dopo l'estrazione del bitume

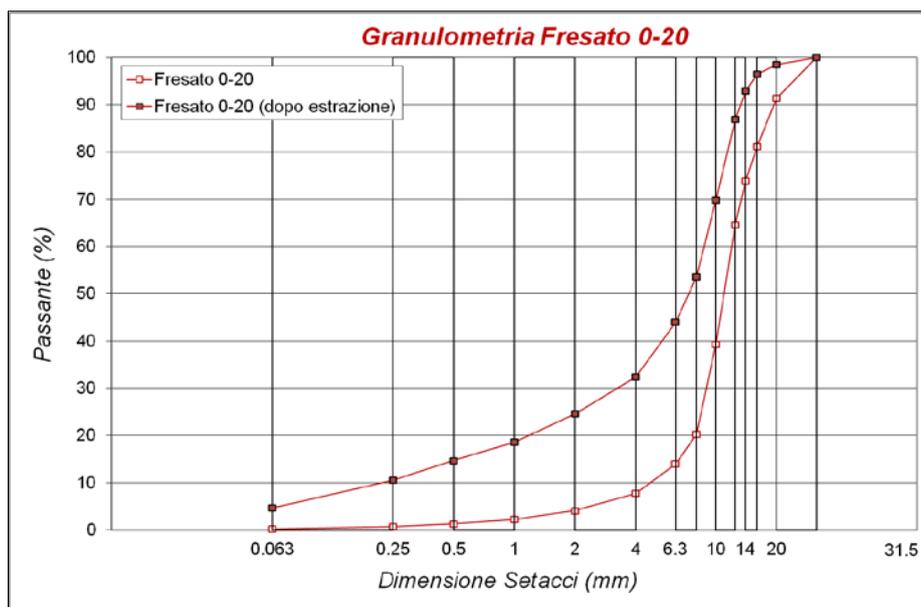



Fig.5.6 - Curva granulometrica fresato 0-20

Fresato 0-10		***Fresato 0-10 (dopo estrazione)***	
Setaccio (mm)	***Passante (%)***	***Setaccio (mm)***	***Passante (%)***
31.5	100.00	***31.5***	100.00
20	100.00	***20***	100.00
16	100.00	***16***	100.00
14	99.21	***14***	100.00
12.5	98.10	***12.5***	100.00
10	96.79	***10***	97.00
8	90.41	***8***	88.90
6.3	79.40	***6.3***	79.00
4	59.68	***4***	59.00
2	38.45	***2***	42.60
1	17.86	***1***	31.60
0.5	6.56	***0.5***	23.70
0.25	1.87	***0.25***	12.00
0.063	0.16	***0.063***	4.70

Tab.5.3 - % Passante 0-10 prima e dopo l'estrazione del bitume

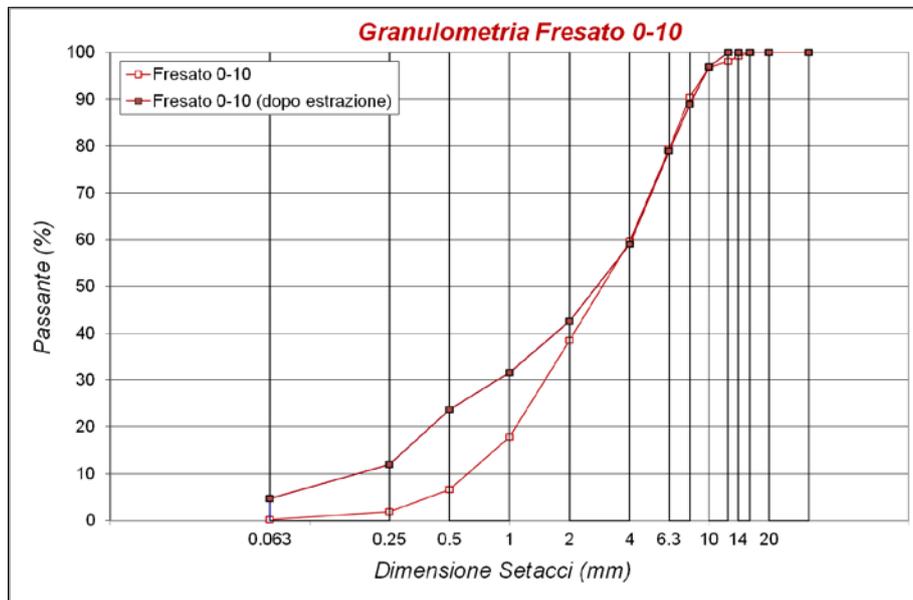



Fig.5.7 - Curva granulometrica fresato 0-10

Sul bitume residuo sono stati effettuati i test di cessione per la verifica della bontà del fresato e dell'idoneità al recupero. In particolare entrambe le pezzature di fresato risultano essere recuperabili ai sensi del D.M. del 5 Febbraio 1998 come modificato dal D.M. 5/04/06 n.186.

Inoltre sono state verificate le percentuali di bitume residuo e su queste sono state misurate la penetrazione e il punto di rammollimento secondo le normative UNI di riferimento (Tab.5.4).

Inerti Riciclati	*EN 1426*	
	% Bitume	*Penetrazione (dmm)*
Fresato 0-20	5.62	68
Fresato 0-10	3.62	70

Tab.5.4 - Caratteristiche del bitume residuo estratto

5.4.1.3 – Cemento e Filler

Per il confezionamento dei provini di Misto Cementato riciclato e non, è stato impiegato cemento Portland pozzolanico, con classe di resistenza 32.5 N/mm2. Il filler calcareo è stato utilizzato solamente nel confezionamento di una miscela di riciclato in quanto i fresati, rispetto agli inerti vergini contengono quantità di filler inferiori rispetto agli inerti vergini.

5.4.1.4 – Acqua

L'acqua impiegata dovrà essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva.

5.4.1.5 – Emulsione Bituminosa

L'emulsione bituminosa utilizzata, è la commerciale RIGEVAL MC per misti cementati ed è stata fornita dalla VALLI ZABBAN s.p.a., società leader in Italia nella produzione di leganti bituminosi per uso stradale, in Tab.5.5 sono elencate le caratteristiche:

CARATTERISTICHE DELL'EMULSIONE	NORMA DI RIFERIMENTO	UNITA' DI MISURA	VALORI NOMINALI	CLASSE
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2mm)	UNI EN 12846	sec	40	4
Effetto dell'acqua sull'adesione	UNI EN 13614	%	95	3
Indice di rottura (metodo del filler minerale)	UNI EN 13075-1	%	190	6
Stabilità alla miscelazione con cemento	UNI EN 12848	%	< 2,0	2
CARATTERISTICHE DEL LEGANTE RECUPERATO TRAMITE EVAPORAZIONE (EN 13074)	**NORMA DI RIFERIMENTO**	**UNITA' DI MISURA**	**VALORI NOMINALI**	**CLASSE**
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	70	3
Consistenza alla temperatura elevata di esercizio Punto di Rammollimento	UNI EN 1227	°C	50	4
CARATTERISTICHE DEL LEGANTE RECUPERATO DOPO PROCEDURA DI STABILIZZAZIONE ED INVECCHIAMENTO EN 14895 /EN 14769)	**NORMA DI RIFERIMENTO**	**UNITA' DI MISURA**	**VALORI NOMINALI**	**CLASSE**
Durabilità -Consistenza intermedia di esercizio - Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	NPD	0
Durabilità - Consistenza alle temperature elevate di esercizio - Punto di Rammollimento	UNI EN 1427	°C	NPD	0

Tab.5.5 – Caratteristiche dell'Emulsione Bituminosa

5.4.1.6 – Polverino di Gomma

Il polverino di gomma proviene dalla frantumazione di pneumatici di autocarro secondo il metodo tradizionale, con frantumazione e successiva setacciatura (Tab.5.6).

Setacci			%	%
Serie	mesh	μm	Trattenut	Passante
-	-	1000	0	100
ISO	20	850	20	80
ASTM	25	710	23	57
ASTM	30	590	7	50
ASTM	35	500	18	32
ASTM	40	425	8	24
ASTM	50	297	10	14
ASTM	100	149	10	4
-	< 100	< 149	4	0

Tab.5.6 - Percentuali di passante ai setacci per il Polverino di Gomma

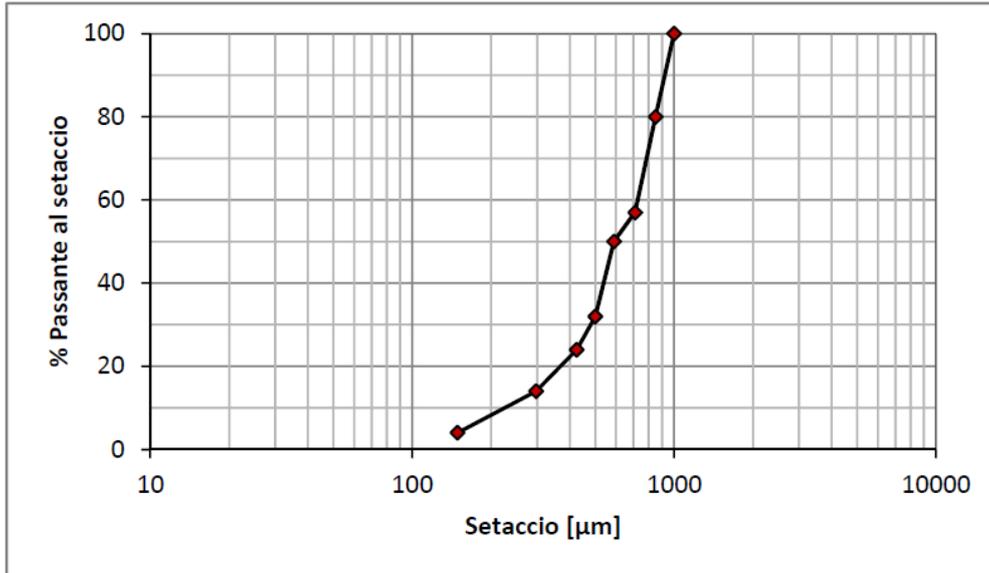



Fig.5.8 - Curva granulometrica Polverino di Gomma

5.4.2 – Mix Design

Il progetto di ricerca in esame ha previsto il confezionamento di due differenti miscele di Misto Cementato, una contenente il 3,5% di cemento sul peso degli aggregati, il 3% di emulsione bituminosa e 1,5 % di polverino, l'altra con le stesse caratteristiche fatta eccezione per la gomma pari allo 0%.

Le due miscele sono identificate rispettivamente con le seguenti sigle:

- **RRE** Misto Cementato tradizionale
- **RREP** Misto Cementato con Polverino di Gomma

Nome Miscela	Fresato F.F. 0-20	Fresato F.F. 0-10	Stabil. Niviano 0-20	Pietrisco F.F. 22-32	Sabbia F.F. 0-4	Filler M.B. 0-1	Cem. 0-1	Rubber 0-1	Totale %
RRE	30	15	18	23	8	2,5	3,5	0	100
RREP	30	14,5	18	23	8	2,5	3,5	0,5	100

Tab.5.7 - Dosaggio degli inerti

Per la costruzione delle curve granulometriche è stato preso come riferimento il fuso del Misto cementato del capitolato Autostrade (Tab.5.8 e 5.9)

Apertura Setacci (mm)	% pass.	Fuso Ap. setacci (mm) / pass %	
80	80,0	100	100
50	50,0	100	100
40	40,0	100	100
31,5	31,5	100	100
20	20,0	70	87
16	16,0	62	77
10	10,0	46	61
6,3	6,3	35	48
4	4,0	28	40
2	2,0	18	30
0,5	0,5	9	19
0,25	0,3	7	16
0,063	0,1	5	10

Tab.5.8 - Percentuali di passante ai setacci UNI EN per la miscela RRE

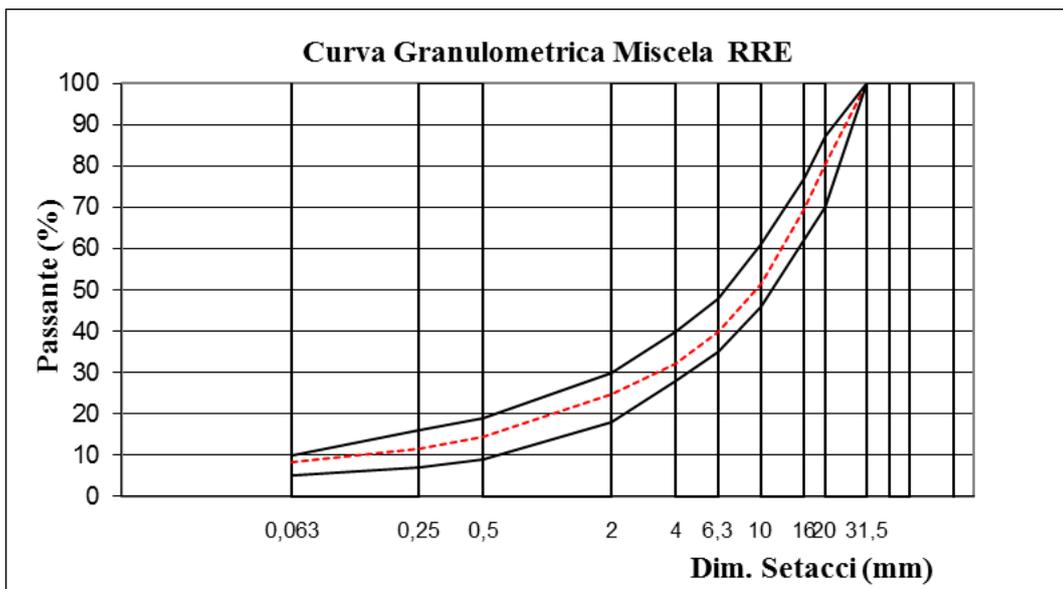



Fig.5.9 – Curva Granulometrica Miscela RRE

Apertura Setacci (mm)	% pass.	Fuso Ap. setacci (mm) / pass %	
80	**100,0**	100	100
50	**100,0**	100	100
40	**100,0**	100	100
31,5	**100,0**	100	100
20	**80,2**	70	87
16	**69,3**	62	77
10	**51,5**	46	61
6,3	**39,8**	35	48
4	**32,5**	28	40
2	**25,2**	18	30
0,5	**14,4**	9	19
0,25	**11,5**	7	16
0,063	**8,3**	5	10

Tab.5.9 - Percentuali di passante ai setacci UNI EN per la miscela RREP

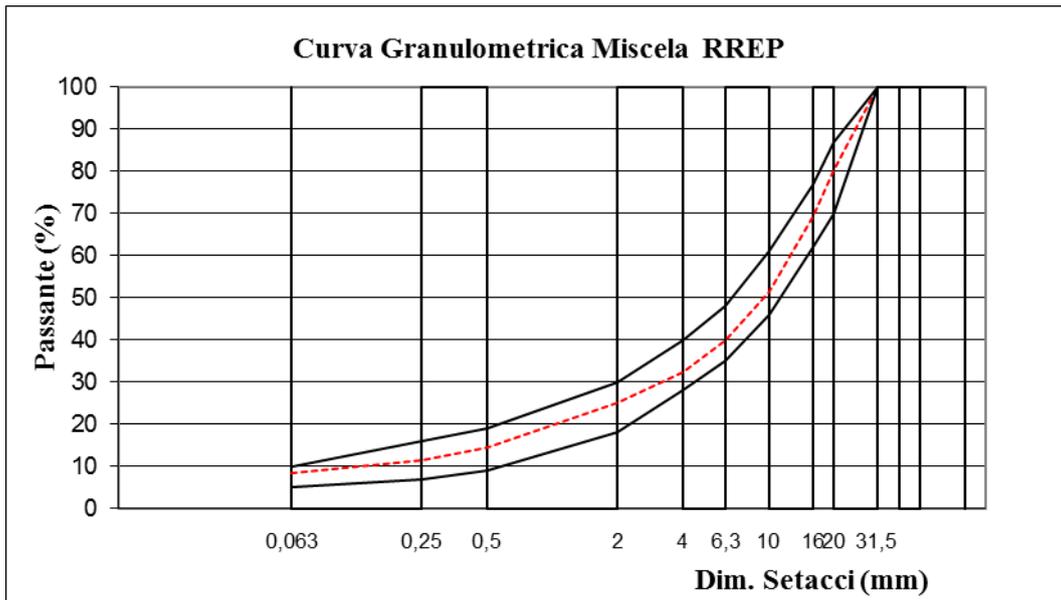



Fig.5.10 – Curva Granulometrica Miscela RREP

5.4.3 - Confezionamento, Compattazione e Trazione Indiretta

5.4.3.1 – Confezionamento delle Miscele

Sono stati realizzati 3 provini per ognuna delle 2 miscele descritte precedentemente aventi diametro pari a 150 mm, la cui compattazione è avvenuta tramite pressa giratoria: 180 giri di rivoluzione alla pressione di 600 kPa e angolo esterno di inclinazione dello stampo pari a 1.25°.

La miscele, per le quali sono state stabilite percentuali di emulsione bituminosa, cemento e pezzatura degli inerti, vengono dunque preparate “a mano” cercando di riprodurre quanto più possibile l’omogeneità che dovrebbero riportare in sito.

Le operazioni sono:

1. Dosaggio e collocazione in una teglia delle varie pezzature del fresato nel rispetto della curva granulometrica di progetto;
2. Accorpo dell’acqua di correzione necessaria al raggiungimento dell’umidità ottimale e successiva miscelazione con il RAP;
3. Costituzione di uno “slurry” tramite impasto del cemento Portland e dell’acqua;
4. Aggiunta dello “slurry” cementizio all’emulsione bituminosa e miscelazione;
5. Aggiunta dei leganti al fresato ed ultima miscelazione fino a completa ed uniforme dispersione della fase liquida
6. Collocazione del conglomerato in una fustella di diametro 150 mm
7. Compattazione del conglomerato mediante pressa a taglio giroscopico o pressa giratoria

5.4.3.2 Confezionamento di provini con Pressa Giratoria secondo UNI EN 12697-31

I compattatori a taglio giroscopici sono apparecchiature in grado di produrre campioni cilindrici aventi caratteristiche di addensamento e di distribuzione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante compattazione con rulli di cantiere.

Il conglomerato collocato all’interno della fustella è sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante avrà una direzione di applicazione inclinata rispetto all’asse della fustella, essendo quest’ultima inclinata di un angolo

prefissato rispetto alla verticale. Simultaneamente, durante il processo di compattazione, il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce tale inclinazione della fustella uniformemente attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata.

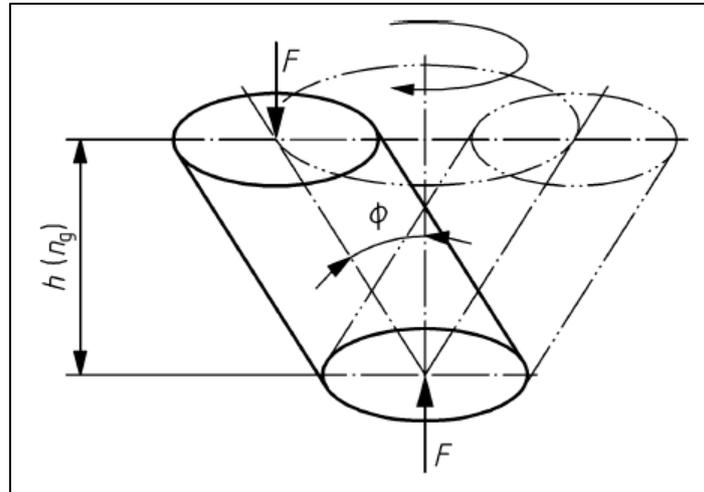



Fig.5.11 - Schema di applicazione del carico

Durante il processo di addensamento con la tecnica giratoria, il conglomerato bituminoso subisce una continua riorganizzazione interna degli elementi costituenti che lo portano ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture sempre più dense al fine di ottenere campioni sempre più rappresentativi del materiale che verrà posto in opera dai mezzi di cantiere.

Mediante l'impiego di tecniche di compattazione impulsive quali la metodologia Marshall, viene indotto un progressivo avvicinamento dei granuli che si interrompe all'atto della formazione di zone di saldo contatto.

La compattazione giratoria determina invece un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture granulari aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito

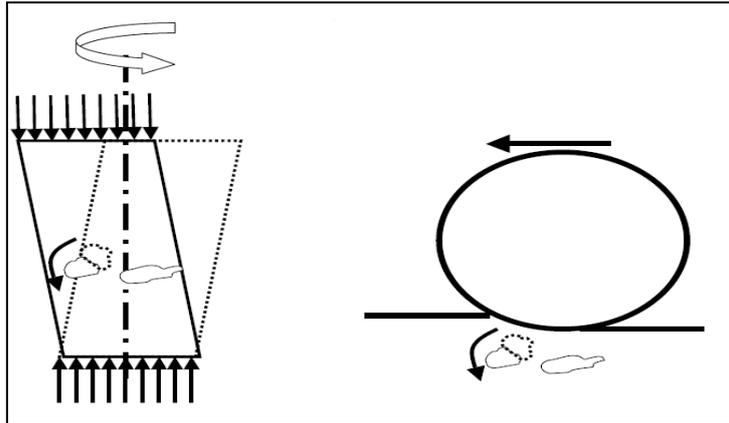



Fig.5.12 - Effetto della compattazione giroscopica in analogia con l'addensamento in sito

Occorre sottolineare che nella letteratura tecnica legata all'utilizzo della pressa giroscopica viene data grande importanza allo stato di addensamento finale raggiunto dal conglomerato bituminoso al termine del fenomeno di compattazione, ma anche alle modalità con le quale tale stato limite viene raggiunto (è possibile valutare le proprietà volumetriche durante il processo di compattazione). Le modalità da seguire per un corretto confezionamento dei provini e loro compattazione mediante pressa giratoria sono racchiuse all'interno dei due seguenti riferimenti normativi:

- Normativa **UNI EN 12697-10**, *"Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 10: Compactability"*;
- Normativa **UNI EN 12697-31**, "Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor".

Analizzando le curve di addensamento ottenute dai dati registrati dal software della pressa, in particolare i grafici che riportano in ascissa, in scala logaritmica, il numero di giri di addensamento ed in ordinata la percentuale di densità massima teorica raggiunta (G_{mm}). La relazione analitica che lega i parametri di compattazione è la seguente:

G_{mm} (%) = G_{mm1} (%) + K log n

Dove: G_{mm1} rappresenta l'addensamento dopo un giro (auto addensamento)

K: rappresenta la pendenza della curva di addensamento

n: rappresenta il numero di giri compiuto dalla fustella

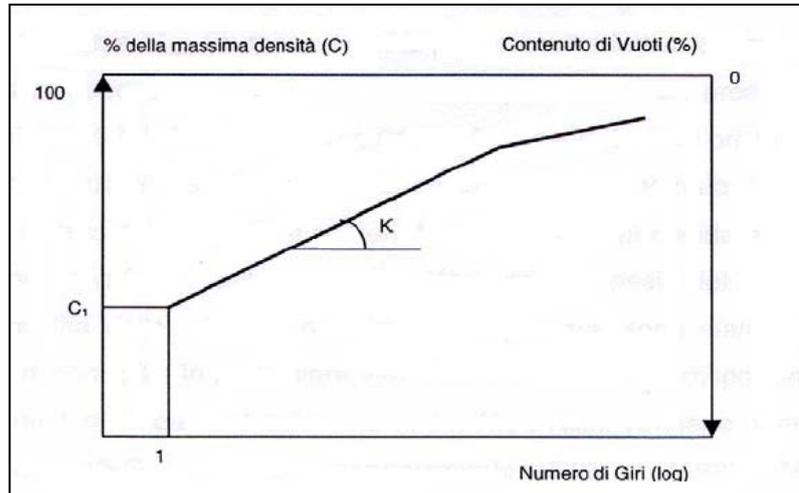



Fig.5.13 - Esempio di una curva di addensamento ottenuta dalla compattazione con pressa giratoria

Analizzando le curve di compattazione si possono trarre alcune importanti considerazioni riguardanti la lavorabilità della miscela e l'addensabilità del materiale rispettivamente espresse dal valore K e da G_{mm}.

Il compattatore giroscopico impiegato nella sperimentazione è prodotto dalla Pine Instrument Company di Grove city, presenta caratteristiche conformi alle prescrizioni tecniche delle norme SHRP per ciò che riguarda l'angolo di inclinazione della fustella, la pressione e la velocità di rotazione. In figura si possono vedere le parti terminali della pressa evidenziate in verde ed il sistema meccanico rotante composto da tre bracci principali indicati in rosso: due fissi solidali alla base rotante e l'altro mobile in grado di inclinare la fustella dell'angolo prestabilito. Quest'ultima, raffigurata nell'immagine di destra, è conformata in modo tale che i cuscinetti possano imprimere l'inclinazione tramite la guida di rotolamento e si completa con le basi che trattengono il materiale compattato all'interno della fustella stessa.

Fig.5.14 - A sinistra foto interna della pressa, a destra della fustella cilindrica

Pressione	200/1000 kPa ± 18 kPa
Angolo di inclinazione	0.50/2.00° ± 0.02°
Velocità di rotazione	30 ± 0.5 giri/min
Massimo numero di giri	999
Diametro e altezze delle fustelle	100 + 0.0 / -0.1 mm x 200 mm 150 + 0.0 / -0.1 mm x 250 mm
Metodo operativo	A numeri di giri A controllo altezza del campione

Tab.5.10 - Caratteristiche tecniche della Pressa Giratoria

Il metodo operativo riguardante il confezionamento dei provini è basato sul controllo del numero di giri, che può essere preimpostato come tutti gli altri parametri di controllo. Si è deciso di adottare 180 rotazioni, impostando quindi il bloccaggio del costipamento al raggiungimento di tale ciclo terminale. Alla pressione di compattazione, all’angolo di inclinazione dell’asse di rotazione e alla velocità di rotazione sono stati assegnati i seguenti valori: 600 kPa, 1° 25’ e 30 giri/min.

5.4.3.3 – Curve di Addensamento

Per ogni campione il software collegato alla Pressa Giratoria registra il valore dell'altezza del provino in relazione al numero di giri.

Gyration Number	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
0	152,8	148,8	152,2
1	149,6	145,6	149,1
2	145,4	141,7	145,1
3	142,5	138,9	142,2
4	140,2	136,7	140,0
5	138,4	134,9	138,2
6	136,9	133,5	136,7
7	135,7	132,3	135,5
8	134,6	131,3	134,4
9	133,6	130,5	133,5
10	132,8	129,7	132,7
11	132,0	129,0	131,9
12	131,4	128,4	131,3
13	130,7	127,8	130,7
14	130,2	127,4	130,2
15	129,7	126,9	129,7
16	129,3	126,5	129,2
17	128,8	126,1	128,8
18	128,4	125,7	128,4
19	127,9	125,4	127,7
20	127,6	125,1	127,4
21	127,3	124,8	127,2
22	127,1	124,6	127,0
23	126,8	124,4	126,8
24	126,6	124,1	126,5
25	126,3	123,9	126,2
26	126,1	123,8	126,0
27	125,9	123,5	125,8
28	125,7	123,4	125,6
29	125,5	123,2	125,4

Launch Comm. Module
Full/ Partial Display
Clear Sheet
Load G1 Data from Disk
Auto-Name
Build G1 Height Report

Fig.5.15 - Esempio di output del software (Numero di giri / Altezza provino)

Per ogni giro della Pressa sono note le altezze in relazione al numero di giri, il peso e il volume (dato che il diametro della fustella definisce anche il diametro del provino cioè 150 mm).

E' possibile allora definire il peso di volume per ogni provino in relazione al numero di giri ed esprimerlo in relazione alla massima densità raggiungibile dal campione stesso (Gmm), la quale è funzione degli aggregati, dei leganti e delle loro rispettive densità.

RREP	**Gmm (g/cmc)**	2,403
RRE	**Gmm (g/cmc)**	2,429

Tab.5.11 - Valori della Gmm per la miscela con e senza polverino

La normativa **UNI EN 12697-5** permette di determinare la massima densità di una miscela mediante procedura matematica, noti i pesi volume e le percentuali dei componenti che la costituiscono, attraverso la relazione:

$$\rho_{max} = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \cdots + (p_b/\rho_b)}$$

Dove:

Gmm = massima densità della miscela [Kg/m^3]
p_{a1}, p_{a2} ... = % di aggregati nella miscela
ρ_{a1}, ρ_{a2} ... = densità apparente degli aggregati [Kg/m^3]
p_b = % di bitume nella miscela
ρ_b = densità del bitume [Kg/m^3]

Il tutto può essere graficato (Fig.5.16), riportando in ascissa il numero di giri in scala logaritmica e in ordinata il rapporto tra Densità al Giro N.(*G*) e densità massima raggiungibile (*Gmm*). Il tutto ovviamente per entrambe le miscele RRE e RREP.

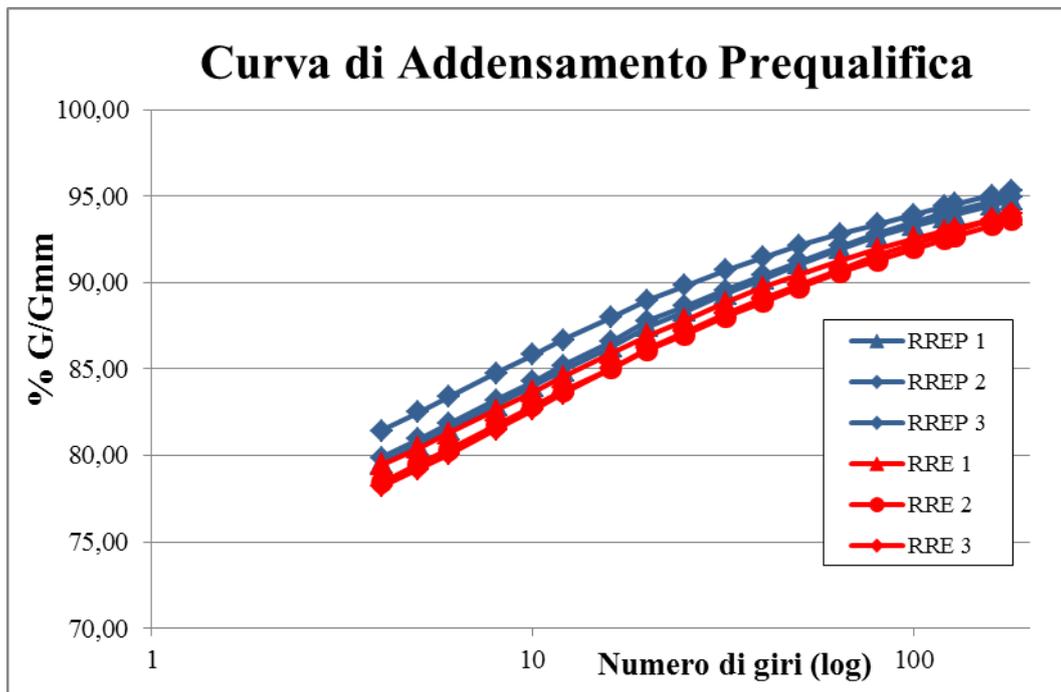



Fig.5. 16 – Curva di Addensamento Misto Cementato RREP (polverino) RRE (no polverino)

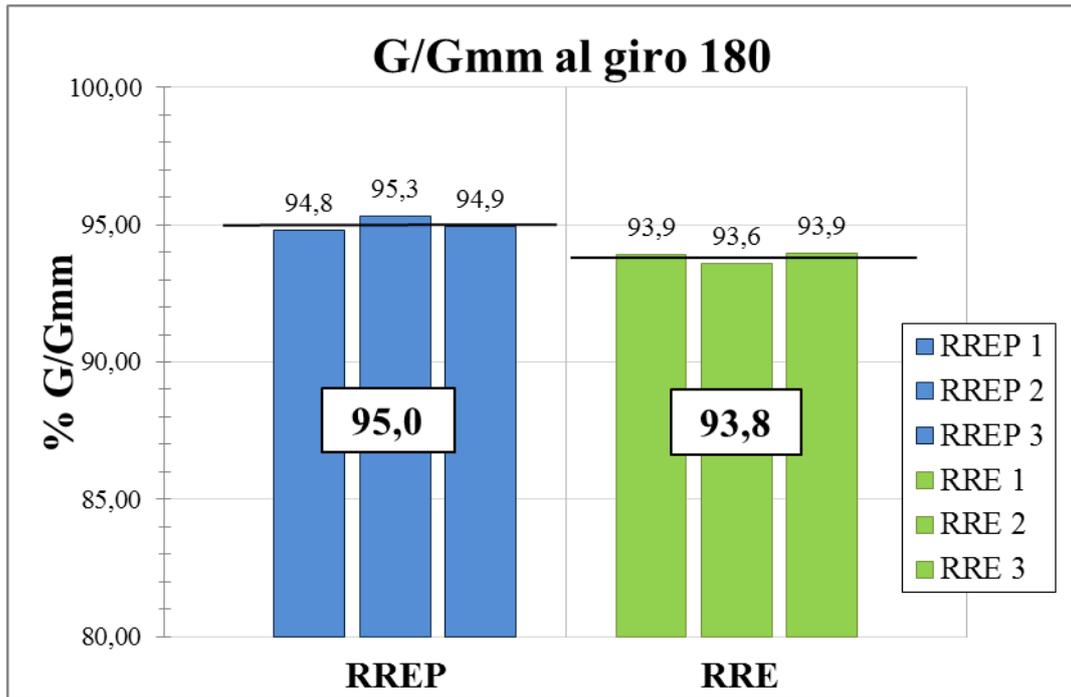



Fig.5. 17 - Rapporto tra G al giro 180 e Gmm per RRE ed RREP

Nelle figure 5.16 e 5.17 si osserva come le curve dei tre provini contenenti nella miscela del polverino (RREP) raggiungano livelli di *%G/Gmm* elevati rispetto quelli senza (RRE); la presenza del polverino infatti sembra migliorarne l'addensabilità, sebbene questo produca in un secondo momento un aumento di volume dovuto al ritorno elastico del materiale. Altro aspetto importante è la valutazione della densità pre / post maturazione, la differenza di *%G/Gmm* in seguito alla maturazione, è in parte dovuta all'emulsione e in parte al polverino di gomma, dato che queste due componenti rendono il materiale più elastico e quindi inducono un recupero delle deformazioni subite durante l'addensamento con pressa giratoria.

	RREP	**RRE**
G/Gmm max	95,01	93,83
G/Gmm post maturazione	94,13	93,51
Δ	**0,88**	**0,32**

Tab.5. 12 - Differenza %G/Gmm prima e dopo la maturazione

5.4.4 Maturazione dei provini

Per ognuna delle 2 miscele descritte in precedenza sono stati preparati un totale di 3 provini aventi diametro pari a 150 mm, la cui compattazione è avvenuta tramite pressa giratoria a 180 giri di rivoluzione alla pressione di 600 kPa e angolo esterno di inclinazione dello stampo pari a 1.25°, come meglio esplicitato nei paragrafo precedente.

Prima di eseguire prove sia statiche che dinamiche i provini sono stati fatti maturare in busta ermetica in modo da trattenere l’umidità, e disposti in stufa per 3 gg. a 40°C, previa pesatura (Fig.5.18).

Alla scadenza del tempo prestabilito è stata rimossa la busta e sono stati successivamente reinseriti in stufa sempre alla medesima temperatura per altri 3 gg.. Una volta estratti, hanno dunque completato la maturazione a 25°C fino a stabilizzazione del peso.

Fig.5.18 - Alcuni provini imbustati

5.4.5 – Trazione Indiretta

Le prove di trazione indiretta sono svolte al termine della maturazione con l’obbiettivo in questo caso, di valutare se l’apporto del polverino possa in qualche maniera incidere sui criteri di resistenza rispetto ad una miscela di stampo tradizionale.

5.4.5.1 Prova di Trazione Indiretta secondo la UNI EN 12697-23

Si definisce resistenza a trazione indiretta ITS, la massima tensione di trazione (calcolata) applicata a un provino cilindrico caricato diametralmente fino a rottura alla temperatura di prova e alla velocità di avanzamento della macchina.

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C; essa consente di stabilire dei criteri di qualità ed accettabilità delle miscele, sia in fase di studio degli impasti, che di comportamento in opera. In questa indagine e solitamente, la prova è condotta alla temperatura di 25°C.

I singoli campioni, dopo stoccaggio per 5h in cella climatica a 25°C, vengono sistemati opportunamente centrati tra i coltelli della pressa. Il posizionamento è eseguito in modo che l'asse dei provini risulti orizzontale, l'asse del coltello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del coltello inferiore ed entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.

Per agevolare la procedura di posizionamento, i coltelli di carico sono realizzati con una superficie concava di raggio di curvatura corrispondente al raggio nominale del provino.

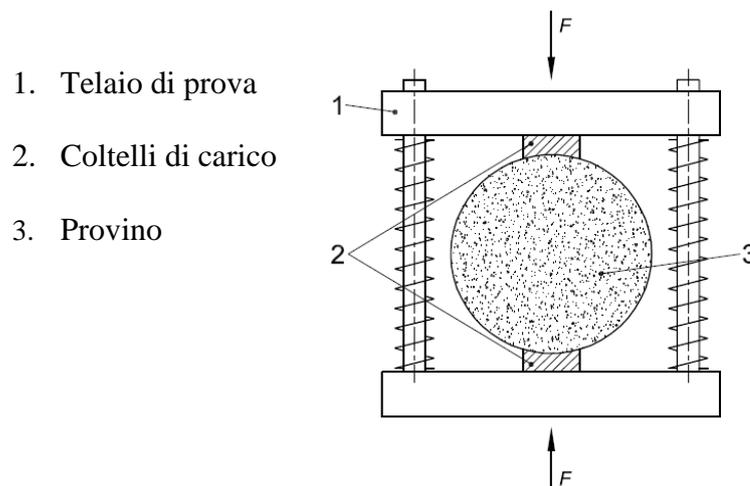



Fig.5.19 - Schema di carico ITS

Secondo la procedura viene applicato un carico impostando una velocità di avanzamento della pressa costante fino al raggiungimento della rottura del provino.

Noto il carico di rottura o carico di compressione massimo misurato durante la prova, il valore della tensione di rottura a trazione indiretta si determina con la seguente relazione:

$$\sigma_T = \frac{2 * P}{\pi * d * h}$$

Dove:

- σ_T è la resistenza o tensione di rottura a trazione indiretta (kg/cm^2)
- P è il massimo carico assiale di compressione registrato (daN o Kg)
- D è il diametro del campione (cm)
- H è l’altezza del campione o spessore (cm)

Nel seguente studio, per la determinazione della σ_T è stata adottata una pressa statica computerizzata da 100 kN Galdabini (Fig.5.20) configurata con tutti i dispositivi necessari per l’esecuzione della prova brasiliana.

Fig.5.20 - Prove di trazione Indiretta con pressa Galdabini

5.4.5.2 - Risultati Trazione Indiretta

La macchina registra con una frequenza di 20 Hz i valori di carico (Kg) applicato e la deformazione corrispondente del provino. I risultati vengono poi salvati su supporto removibile per poter essere elaborati e graficati per studiare il comportamento dei provini.

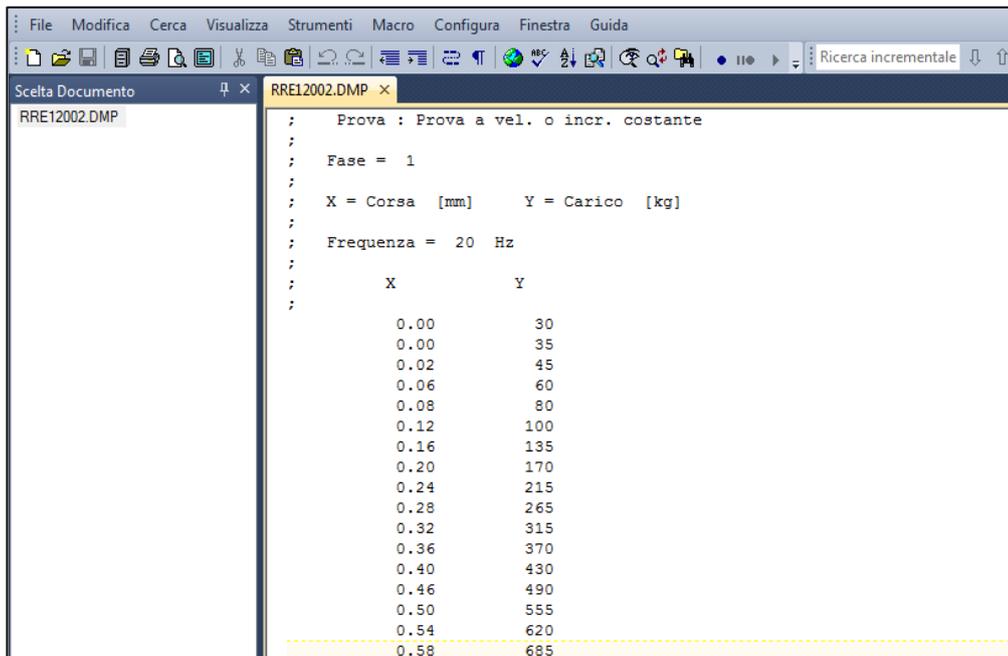



Fig.5.21 – Esempio di schermata di output

Il dato "grezzo" dunque è costituito da una serie di coppie di numeri rappresentanti Forza e Deformazione corrispondente, tuttavia a livello ingegneristico è utile ragionare in termini di tensioni, facilmente determinabili avendo note le caratteristiche geometriche del provino e il carico ad esso applicato, i valori delle tensioni sono riportati nel grafico di Fig.5.22, quelli delle deformazioni in Fig.5.23.

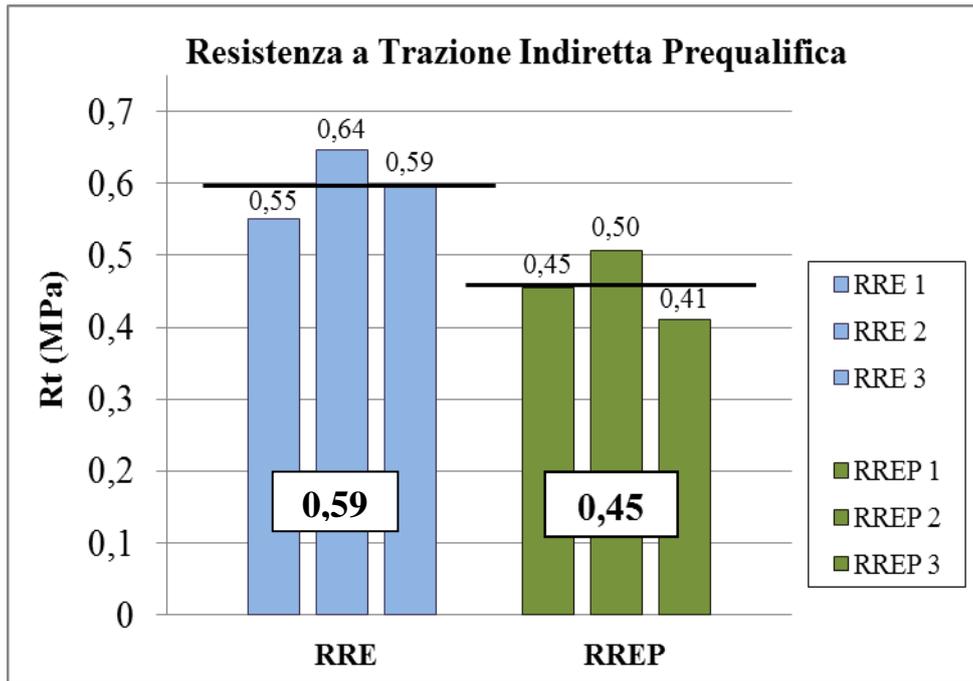



Fig.5.22 - Valori delle tensioni a rottura nelle due miscele

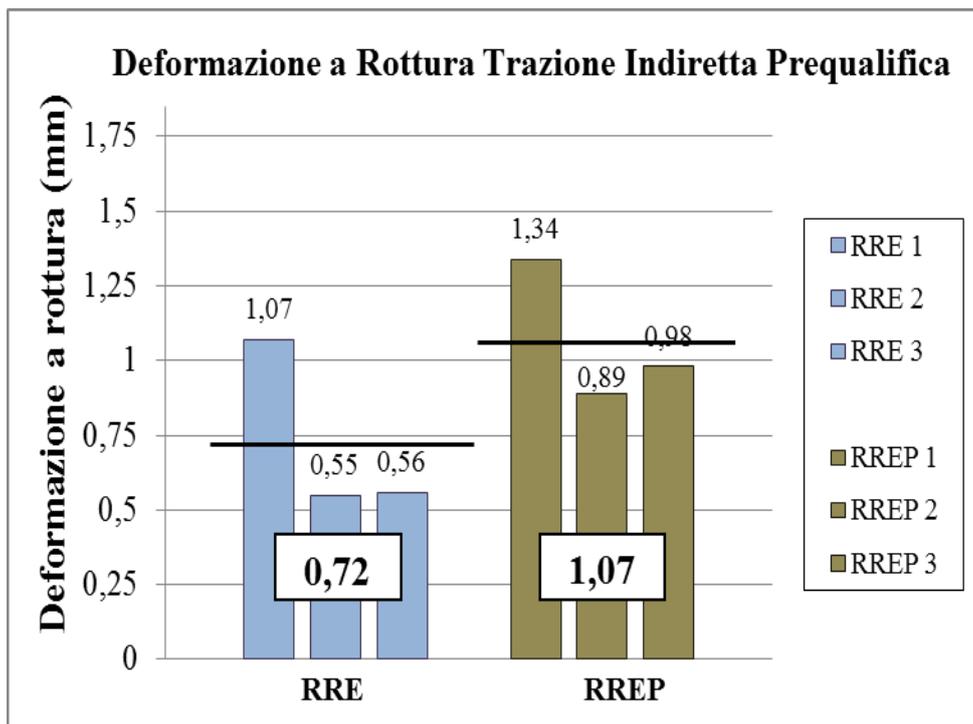



Fig.5.23 - Valori delle Deformazioni a rottura nelle due miscele

In figura 5.22 si può notare come i valori della tensione di rottura nei provini contenenti polverino di gomma (RREP) risultino più bassi di quelli confezionati senza (RRE).

Il polverino infatti conferisce meno rigidità al materiale, considerazione questa oltremodo osservabile nei valori delle deformazioni a rottura, nettamente più alti nella miscela contenente PFU (Fig.5.23).

5.5 – Controllo della lavorazione in opera

5.5.1 – Introduzione

Una volta terminata la prequalifica si ha una panoramica delle caratteristiche meccaniche e di addensabilità che è lecito aspettarsi da un materiale, il quale però viene confezionato in laboratorio, dove tutto avviene secondo le migliori condizioni possibili. Lo step successivo riguarda lo studio del comportamento del medesimo materiale in sito, quando non sempre le condizioni di temperatura ed umidità sono quelle ottimali.

Nel paragrafo 5.3 sono state descritte le fasi di messa in opera del materiale, o meglio delle due miscele, una contenente polverino (RREP) stesa per un tratto complessivo di 80 m, l'altra senza (RRE) stesa per un tratto di circa 40 m.

5.5.2 – Confezionamento dei provini e Nomenclatura

Una volta steso, è stato prelevato del materiale fresco con il quale si sono confezionati dei provini, parte in sito tramite il laboratorio mobile e parte presso il laboratorio *DICAM-Strade*.

Le modalità di esecuzione per confezionamento di provini con Pressa Giratoria secondo **UNI EN 12697-31** sono state già affrontata precedentemente al paragrafo *5.4.3.2*.

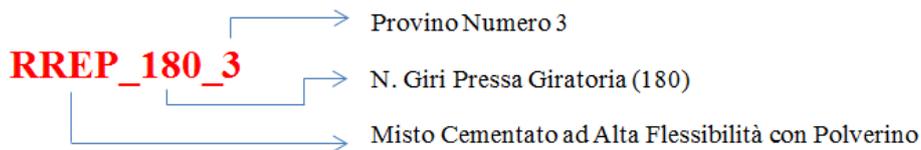
Con la Pressa Giratoria è possibile fissare l'altezza o il numero di giri, al fine di avere diversi livelli di compattazione, in ragione di ciò sono stati prodotti provini sia a 180 che a 120 giri per ognuna delle due tipologie di miscele in esame, per un totale di 21 campioni.

Lo schema che segue riassume il numero di provini confezionati per tipologia di miscela e numero di giri :

Tipo di miscela	RREP		RRE	
N. Giri Pressa Giratoria	180	120	180	120
Laboratorio mobile	-	6	6	3
DICAM- Strade	6	-	-	-

Tab.5.13 - Numero di provini prodotti per tipologia

Per avere una rapida identificazione dei provini è stata adottata una sigla alfanumerica che sintetizza : tipologia di miscela (RRE o RREP) , numero di giri della Pressa Giratoria, numero identificativo del provino.

Ad esempio :

5.5.3 – Curve di addensamento

Come già detto in precedenza il software registra il valore dell'altezza h al giro N, sono noti i pesi, dunque è possibile determinare il peso di volume di ogni provino e la massima densità *Gmm*, funzione delle densità di inerti e leganti.

Esprimendo gli ultimi due valori in relazione al numero di giri in scala logaritmica (180 e 120), è possibile costruire le curve di addensamento che sono riportare qui di seguito (Fig.5.24 e 5.25).

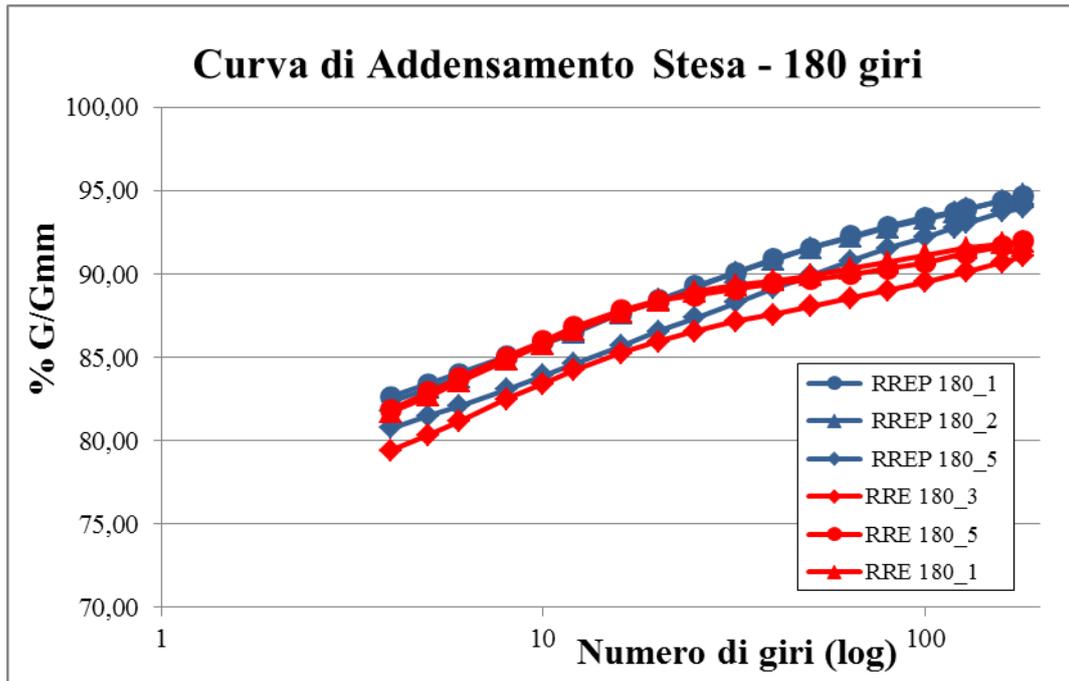



Fig.5.24 - Curva di addensamento a 180 giri per RREP ed RRE

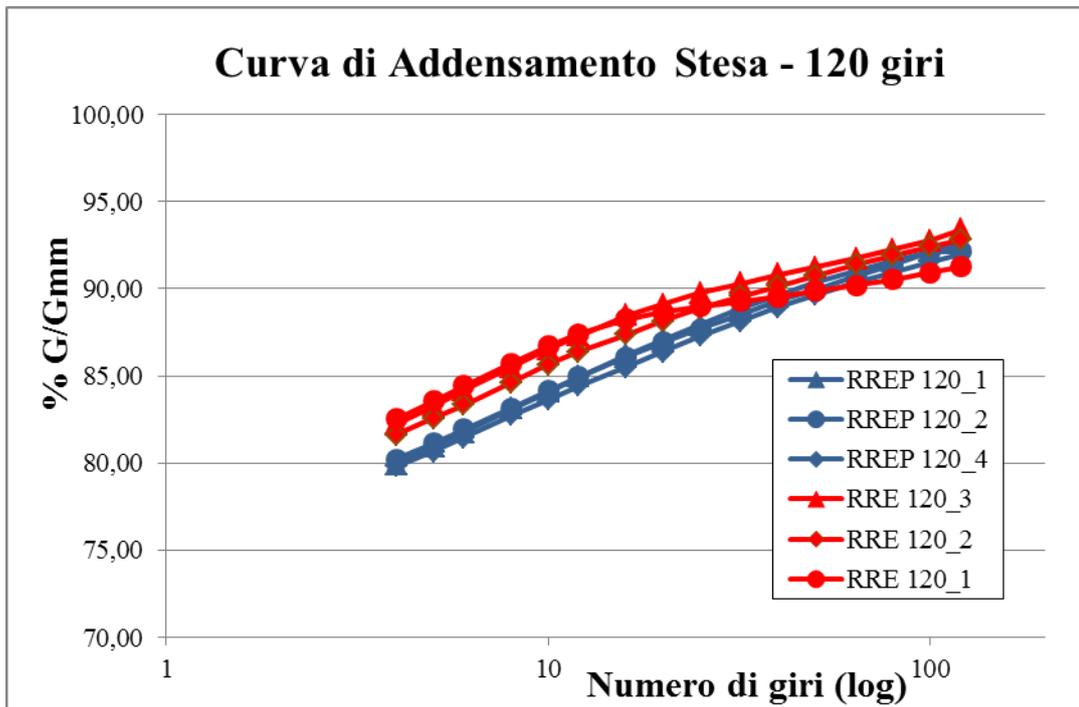



Fig.5.25 - Curva di addensamento a 120 giri per RREP ed RRE

Come già osservato in prequalifica, la presenza del polverino permette di raggiungere livelli di % G/Gmm più alti (curve blu Fig.5.24) date le caratteristiche “elastiche” del materiale. Questo risulta tuttavia meno evidente nelle curve di Fig.

5.25 relative ad un numero di giri pari a 120, un numero forse troppo basso di giri per sollecitare al massimo i campioni.

In Fig. 5.26 viene riportato dunque il rapporto tra *G* al 180 e 120 giro in relazione alla *Gmm*, nella quale è possibile verificare l'osservazione espressa, in merito ad una diminuzione della densità massima in funzione del numero più basso di giri.

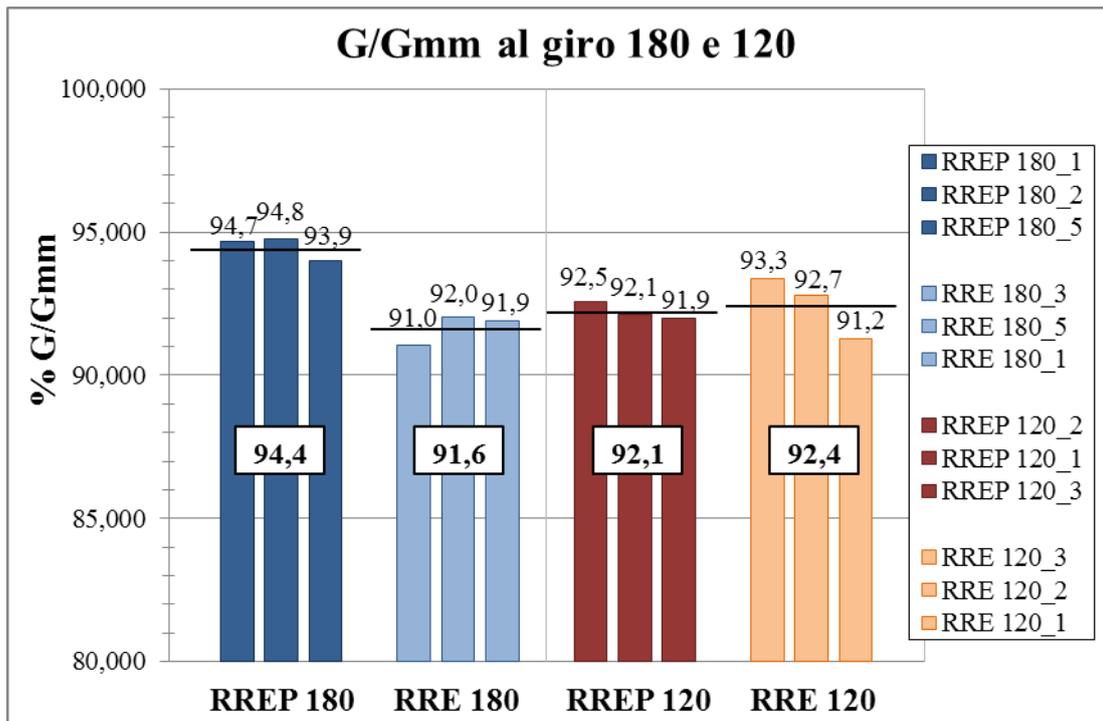



Fig.5.26 - Rappresentazione del rapporto G /Gmm con G al 180 e 120 giro per entrambe le miscele

Uno degli obbiettivi di questa seconda parte di ricerca è la valutazione del differente comportamento del materiale interamente miscelato e confezionato in sito con quello prelevato in sito.

Si considerino dunque le curve di addensamento prequalifica / stesa a 180 giri (Fig.5.27 e 5.28), dato che il confezionamento nella fase preliminare è avvenuto con il medesimo numero di giri.

Si noti come le curve relative ai provini contenenti polverino studiate in prequalifica (curve rosse) siano leggermente al di sopra ma tutto sommato simili rispetto quelle relative al materiale steso (curve blu).

Lo stesso non può dirsi del Misto Cementato RRE steso, il quale probabilmente è stato fortemente condizionato dalle condizioni climatiche in fase di lavorazione,

presentando un raggiungimento del rapporto G/Gmm più basso di quello confezionato in laboratorio.

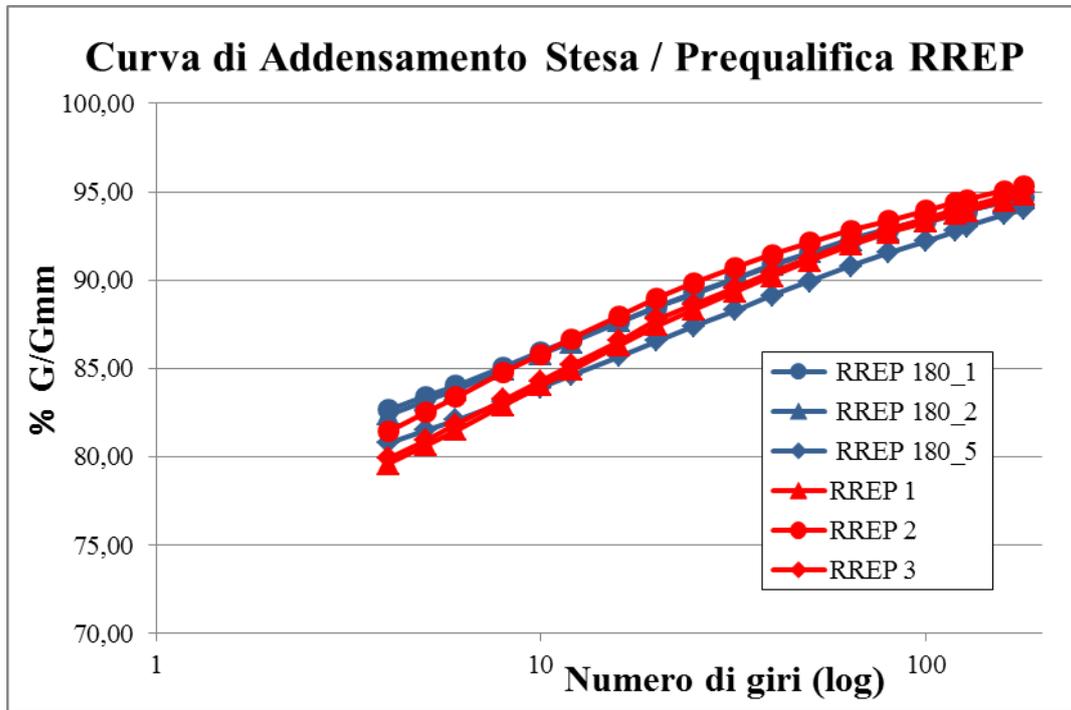



Fig.5.27 - Confronto curve di addensamento stesa / prequalifica per materiale contente polverino

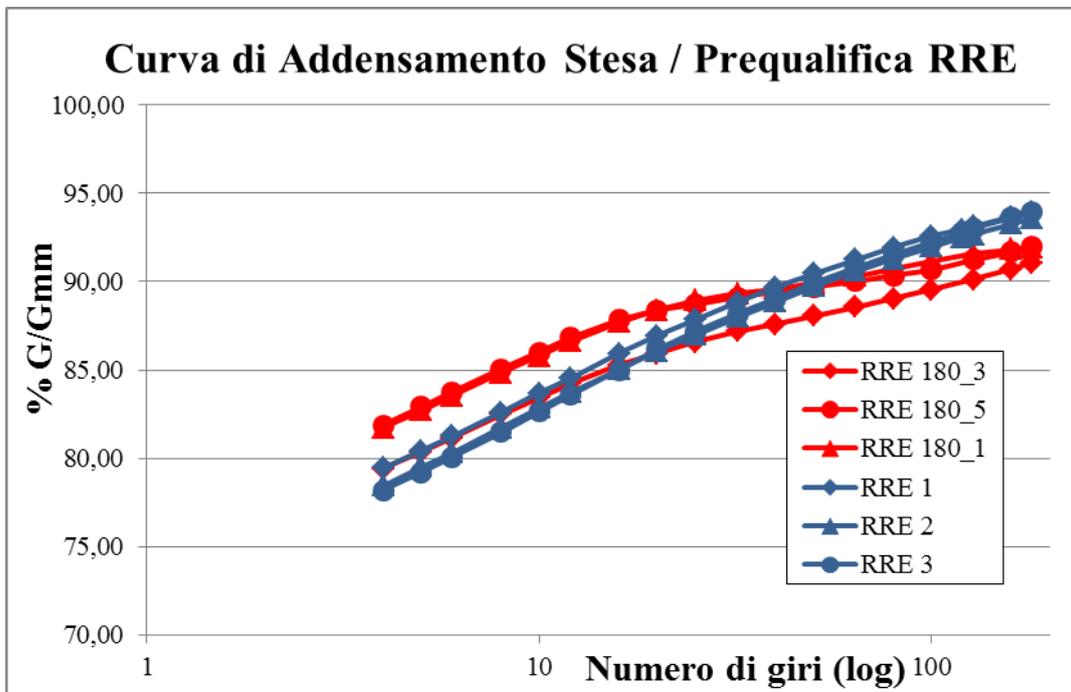



Fig.5.28 - Confronto curve di addensamento stesa / prequalifica per materiale non contente polverino

Come già detto in precedenza il processo di maturazione favorisce la variazione del grado di addensamento massimo, in tabella 5.14 è rappresentata la variazione in termini assoluti del rapporto *G/Gmm* prima e dopo la fase di maturazione indicata nella sigla dalla lettera M.

Si noti come nei provini contenenti polverino, all'effetto della maturazione si associ il ritorno elastico producendo un **Δ** superiore sia a 120 che a 180 giri.

	PROVINI STESA			
	RREP 120	**RRE 120**	**RREP 180**	**RRE 180**
G/Gmm max	92,23	92,47	94,48	91,67
G/Gmm post maturazione	91,66	92,64	92,95	91,06
Δ	**0,56**	0,17	**1,53**	0,60

Tab.5.14 - Differenza %G/Gmm prima e dopo la maturazione

Negli istogrammi di figura 5.29 e 5.30 sono riportate le differenze i valori del rapporto G/Gmm per miscele con e senza polverino a 180 e 120 giri, prima e dopo maturazione, notando come si abbassi valore delle densità massima in entrambi i casi.

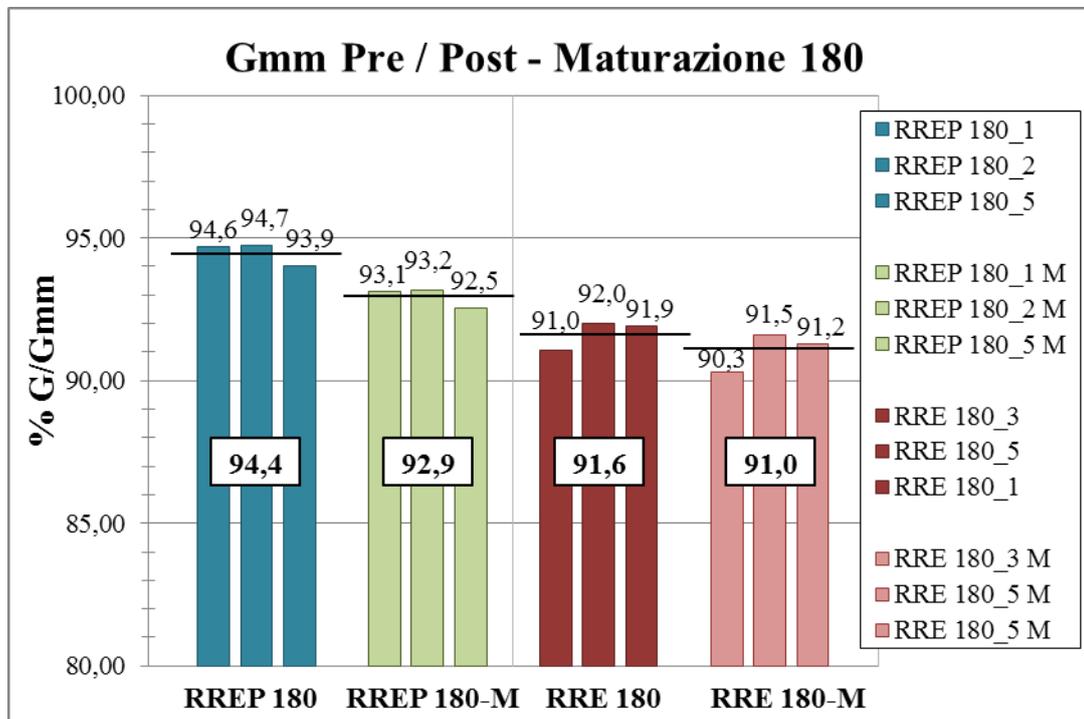



Fig.5.29 - Variazione G/Gmm, pre / post maturazione per RRE ed RREP a 180 giri

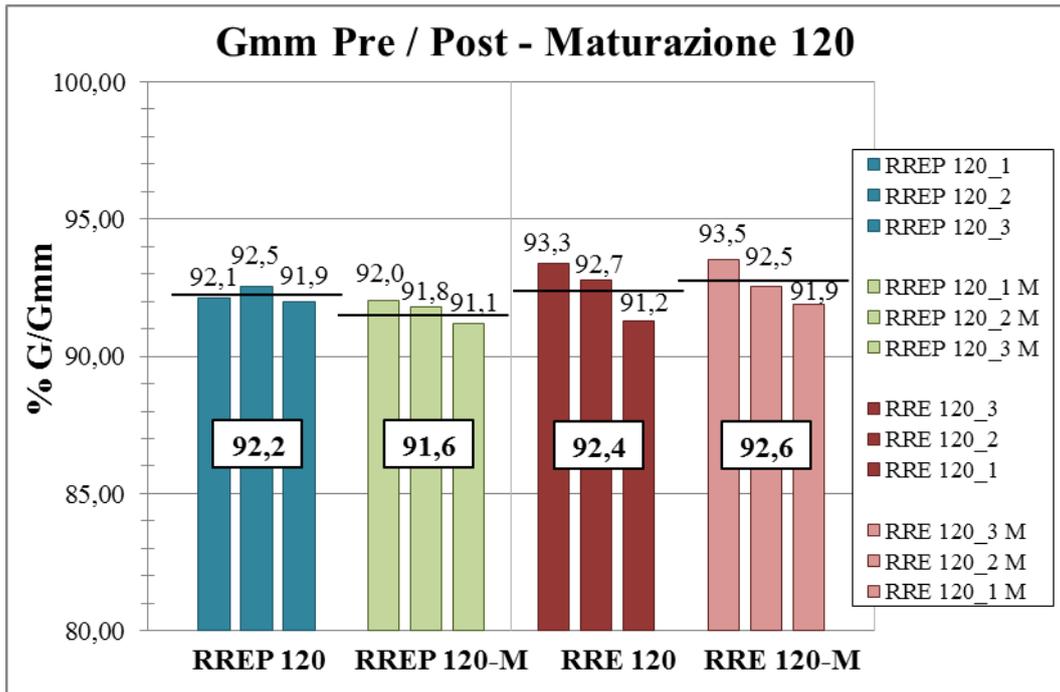



Fig.5.30 - Variazione G/Gmm, pre / post maturazione per RRE ed RREP a 120 giri

La tabella 5.15 riporta sinteticamente i valori dei Δ di densità tra prequalifica e stesa, da notare come anche nella fase preliminare il gap è significativo per la miscela contenente polverino.

	PRE-QUALIFICA		STESA	
	RREP	**RRE**	**RREP 180**	**RRE 180**
G/Gmm max	95,01	93,83	94,48	91,67
G/Gmm post maturazione	94,13	93,51	92,95	91,06
Δ	**0,88**	0,32	**1,53**	0,60

Tab.5.15 - Differenza %G/Gmm prima e dopo la maturazione in prequalifica e in stesa

5.6 – Caratterizzazione Meccanica del materiale steso

5.6.1 – Introduzione

Al seguito del processo di maturazione si è dunque proceduto alla determinazione delle caratteristiche meccaniche statiche (ITS) e dinamiche (ITSM) delle miscele.

Le modalità del processo di maturazione sono state enunciante al paragrafo 5.4.4 così come le modalità di esecuzione della Prova di Trazione Indiretta secondo la **UNI EN 12697-23** al paragrafo 5.4.5.1.

In questo paragrafo effettuerà un analisi dei dati estrapolati da ITS e ITSM per il materiale steso, con riferimento a quelli provenienti dalla fase di studio preliminare.

5.6.2 – Analisi dei dati da ITS a 25°C

Come già detto in precedenza la macchina registra con una frequenza di 20 Hz i valori di carico (Kg) applicato e la deformazione corrispondente del provino. Dalle curve di carico relative ai provini confezionati con 120 giri di pressa giratoria, si può notare come i valori di carico massimo siano più bassi nella miscela contenente PFU, date le caratteristiche “elastiche” del polverino di gomma.

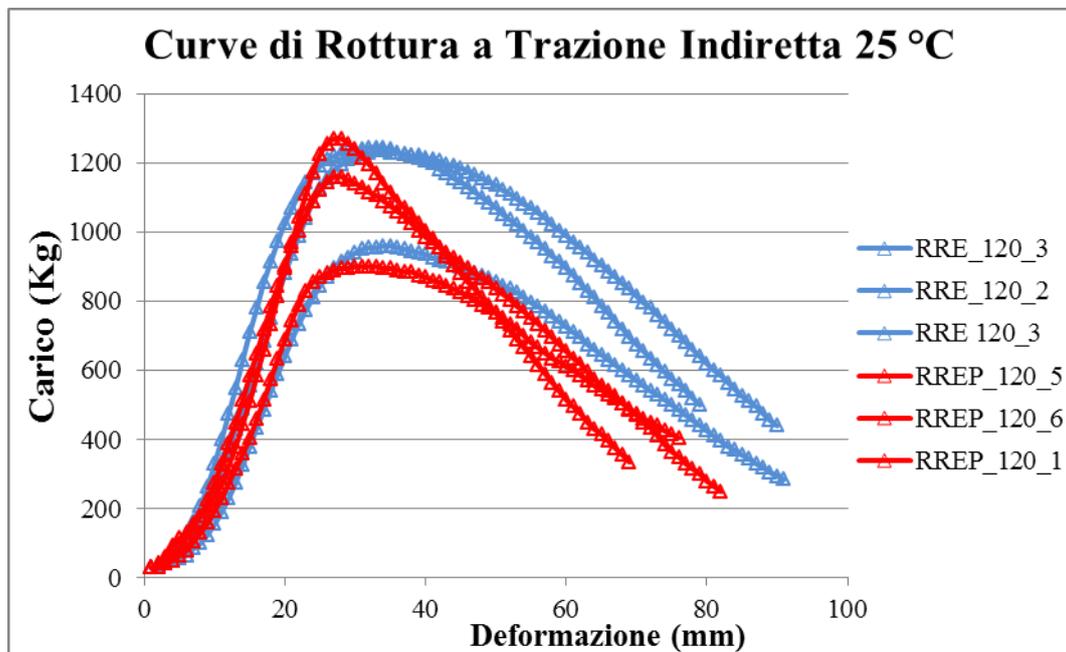



Fig.5.31 - Esempio di curve Carico – Deformazione

Tali curve però non tengono contro delle dimensioni del provino, per questo è più opportuno ragionare in termini di tensioni applicate. Sono riportati in Fig.5.34 e 5.35 i valori di tensione e di deformazione a rottura nelle due miscele a 180 e 120 giri.

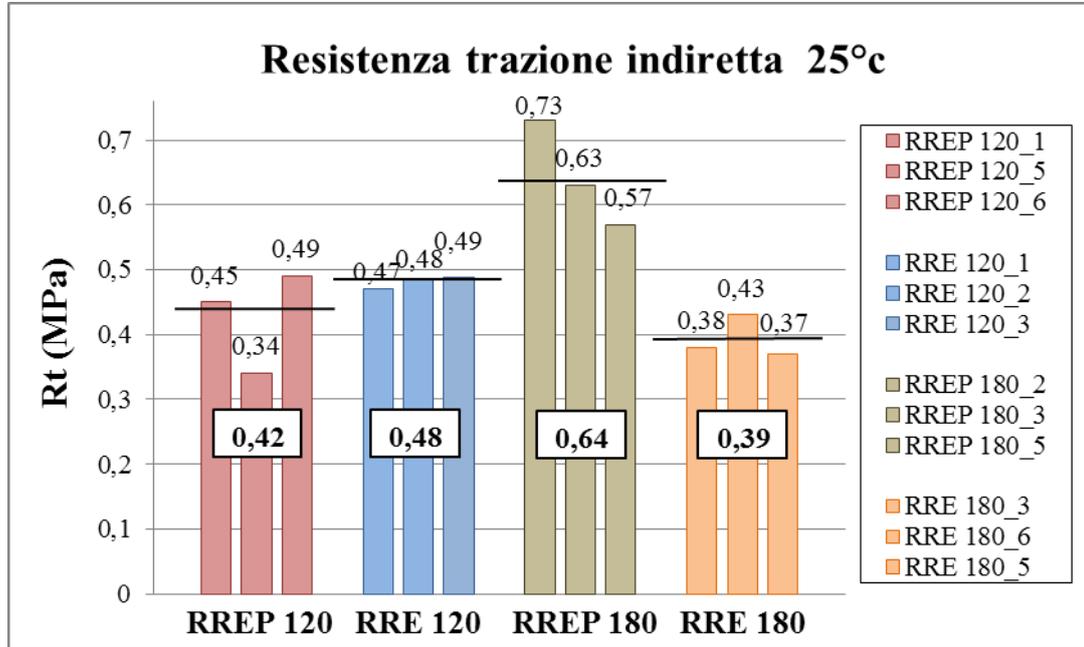



Fig.5.32 - Valori delle Tensioni a rottura nelle due miscele a 120 e 180 giri

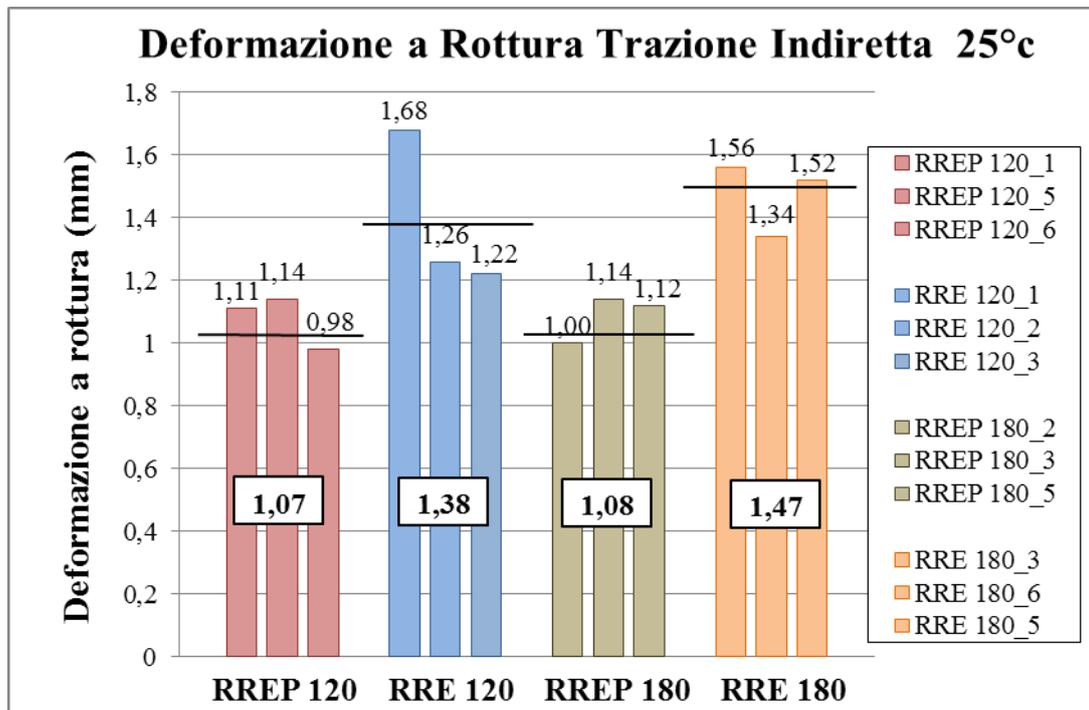



Fig.5.33 - Valori delle Deformazioni a rottura nelle due miscele a 120 e 180 giri

Come preventivato nella prequalifica, nei misti cementati contenenti polverino il valore della tensione di rottura risulta essere inferiore a fronte di una deformazione più consistente quantomeno nei provini a 120 giri.

Dai grafici si evince come questo non si verifichi nel caso a 180, la motivazione di questa disparità è da imputarsi a 4 considerazioni principali:

- Il materiale contenente polverino è stato steso prima (provini confezionati subito) e dunque è stato meno soggetto alle condizioni climatiche di stesa non ottimali;
- Il misto cementato RRE, steso in una seconda fase è stato soggetto ad una leggera precipitazione che potrebbe aver modificato le caratteristiche di resistenza;
- L'addensamento a 180 giri disidrata di più il materiale, il polverino ha un comportamento a spugna espellendo più acqua e favorendo in qualche modo la maturazione con un conseguente aumento delle resistenze;
- Il contenuto di cemento è fondamentale per far si che la miscela abbia caratteristiche meccaniche elevate, in fase di prequalifica viene fatto manualmente in un area ristretta mentre in sito viene fatto con una Spandicalce su un area più ampia;

Nelle figure 5.34 e 5.35 sono confrontati i valori di tensione e deformazione massima a rottura per ITS in prequalifica e in stesa. Si possono riscontrare le considerazioni sin qui fatte in merito alle problematiche che una lavorazione in opera può esplicare rispetto quelle di uno studio in laboratorio.

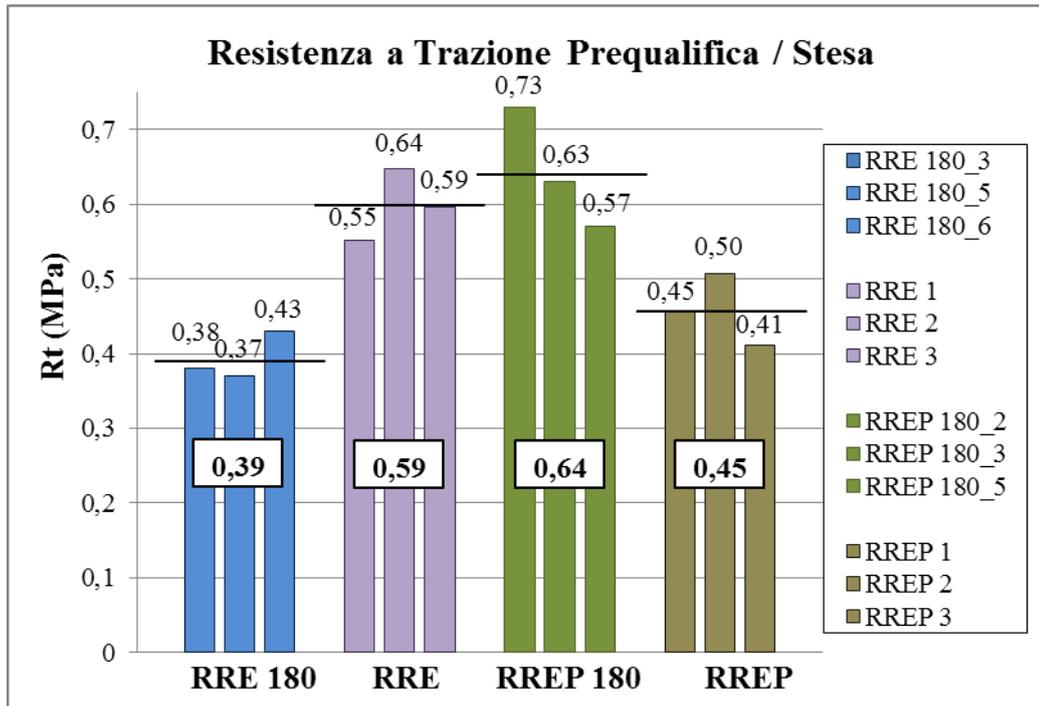



Fig.5.34 - Valori delle Tensioni a rottura nelle due miscele, in stesa / prequalifica

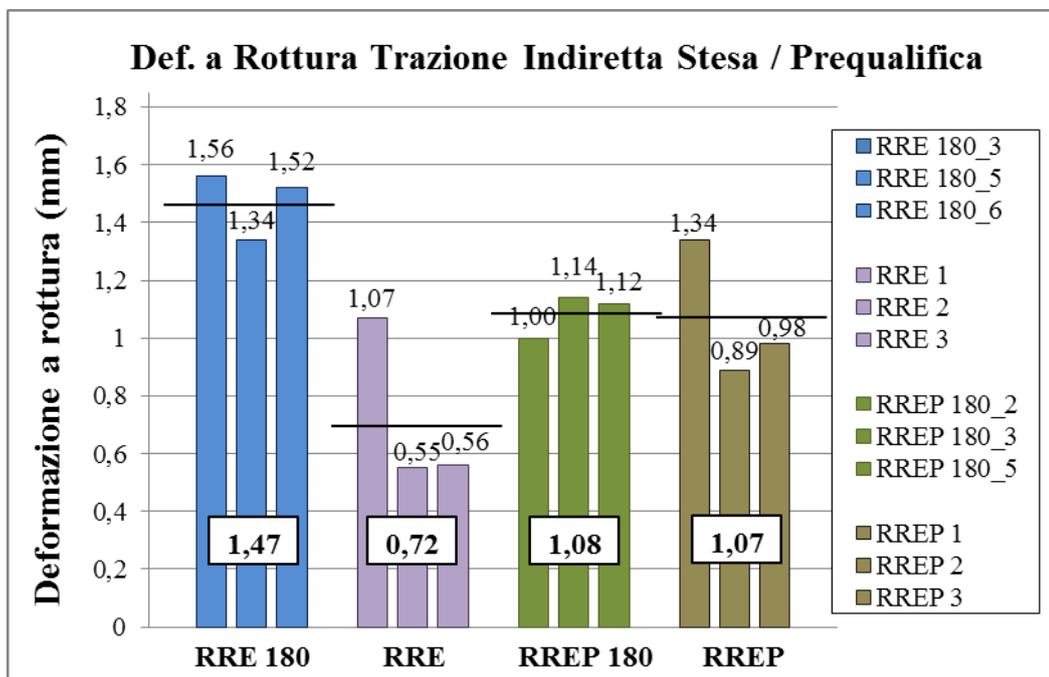



Fig.5.35 - Valori delle Deformazioni a rottura nelle due miscele, in stesa / prequalifica

Contrariamente a quanto visionato in prequalifica e nei provini a 120 giri, quelli a 180 forniscono un valore maggiore di tensione di rottura nella miscela contenete polverino di gomma, rispetto quella senza. Le possibili motivazioni sono state già individuate in precedenza, nonostante ciò i valori medi di tensione di rottura sono in linea con quelli del **Capitolato Speciale D'appalto A.N.A.S.** il quale suggerisce un valore di tensione a rottura per ITS a 25°C pari a 0,26 - 0,35 Mpa per provini maturati a 3gg. e 0,3 - 0,5 Mpa per provini a 7gg, maturati a 40 °C, aventi diametro di 100 mm e sottoposti a 180 giri di Pressa Giratoria.

5.6.3 – Test ITSM per la determinazione del Modulo di Rigidezza

La sovrastruttura stradale è sottoposta alle sollecitazioni imposte dal traffico veicolare, è possibile riscontrare due tipologie di sollecitazione :

- Veicoli Leggeri: più veloci causano carichi di minore entità e di minore durata
- Veicoli Pesanti: più lenti provocano carichi di maggiore entità e maggiore durata

La sollecitazione complessiva è data dall'insieme delle due, questa viene simulata in laboratorio applicando sollecitazioni di tipo dinamico misurando sia l'entità della deformazione, la quale fornisce informazioni sulla rigidezza, sia il ritardo con cui questa si manifesta, in maniera tale da riuscire a valutare anche la componente viscosa

Il test viene eseguito con il supporto di un software con il quale è possibile controllare automaticamente tutte le variabili in gioco: il tempo di picco del carico applicato, la tensione di target fissata, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova, la sollecitazione effettiva di trazione sul diametro verticale, ecc.

Fondamentale è la scelta delle condizioni di prova (velocità d'applicazione dei carichi e temperatura) in modo da poter rendere possibile l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare (materiale assunto come un corpo omogeneo ed isotropo). Nella prova ITSM (indirect tensile modulus test), il modulo di rigidezza del campione è funzione della geometria del provino, della deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson.

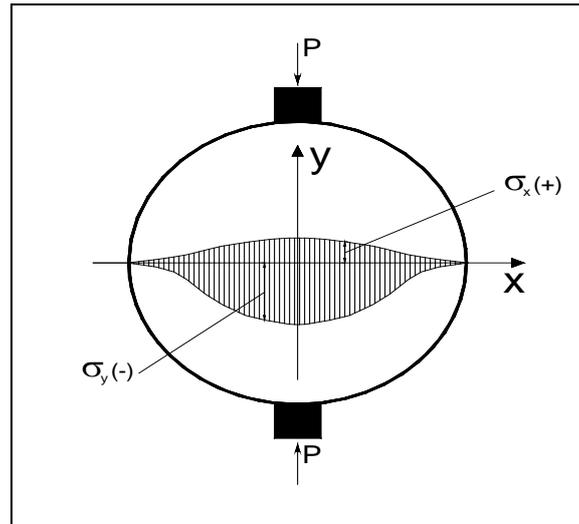



Fig.5.36 – Stato di sollecitazione che si sviluppa durante la prova

Lungo il diametro orizzontale le sollecitazioni massime in trazione nella direzione x sono fornite dalla seguenti espressioni in cui *P* rappresenta il carico appilcato, *d* il diametro e *h* spessore o altezza del campione:

1) $$\sigma_{x(\mathrm{max})} = \frac{2*P}{\pi*d*h} \qquad \sigma_{x(\mathrm{media})} = \frac{0.273*P}{\pi*d*h}$$

Nella direzione y invece:

2) $$\sigma_{y(\mathrm{max})} = \frac{-6*P}{\pi*d*h} \qquad \sigma_{y(\mathrm{media})} = \frac{-P}{d*h}$$

Il modulo di rigidezza elastica, sulla base di questa teorica distribuzione delle sollecitazioni, può essere rappresentato in termini di deformazione di un elemento, soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La corrispondente deformazione orizzontale dell’elemento è:

3) $$\varepsilon_{x(media)} = \frac{\sigma_{x(media)}}{E} - \upsilon \frac{\sigma_{y(media)}}{E}$$

Con:

E è il modulo elastico del materiale
υ è il coefficiente di Poisson

Sostituendo le espressioni (1) e (2) corrispondenti ai valori medi e tenendo conto che la deformazione orizzontale totale dei campioni (Δ) si ottiene moltiplicando la deformazione unitaria ε media per il diametro del campione, si ottiene la formula (4):

$$4) \qquad \Delta = \frac{0.273 * P}{E * h} + \upsilon \frac{P}{E * h}$$

Dalla (4) è possibile ricavare il modulo elastico che avrà la seguente espressione :

$$5) \qquad E = \frac{P}{\Delta * h} * (0.273 + \upsilon)$$

La **UNI EN 12697-26** definisce il modulo di rigidezza E come il modulo del modulo complesso. Quest'ultimo è rappresentato mediante un numero complesso definito da una componente elastica reale (6) e una viscosa immaginaria (7):

6) $E_1 = |E^*| * cos\varphi$ (componente elastica o modulo di restituzione)

7) $E_2 = |E^*| * sen\varphi$ (componente viscosa o modulo di dissipazione)

dove: $|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$; $\varphi = arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$.

Il software fornisce anche un valore del modulo di rigidezza corretto da un fattore di aggiustamento che tiene conto della forma dell'onda di carico che di volta in volta la macchina trasferisce al campione e della temperatura attuale di prova. Tale modulo è detto aggiustato è si ricava dalla seguente relazione (8):

$$8) \qquad E^I = E * (1 - 0.322 * (\log(E) - 1.82) * (0.60 - k))$$

dove k è il fattore dell'area di carico misurato

Il carico P, responsabile delle tensioni interne e della deformazione, avrà, come già detto, la forma di un impulso e sarà definito, per il corretto svolgimento della prova, da tre parametri:

1) Peak load (il carico massimo applicato ad ogni ciclo);
2) Pulse repetition period (tempo che intercorre tra l'inizio di due impulsi consecutivi);
3) Rise time (tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il peak load);

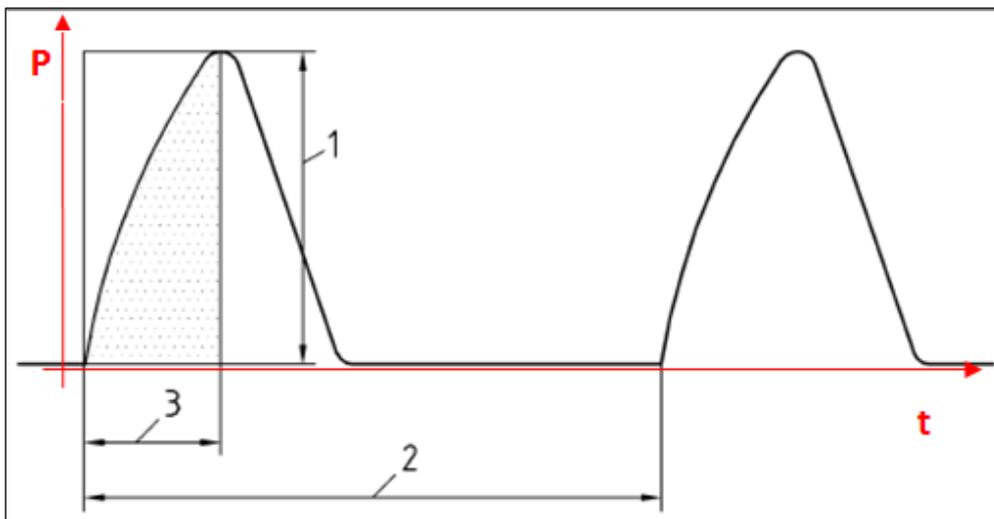



Fig.5.37 - Variazione di P in funzione del tempo t

La normativa di riferimento considerata è la **EN 12697-26**, la quale raccomanda per provini di diametro 150 mm, un rise time di $124 \pm 4\, ms$, un peak load scelto in funzione della deformazione orizzontale che dovrà rientrare nell'intervallo $7 \pm 2\mu m$ ed il pulse repetition period di $3{,}0 \pm 0{,}1\, s$.

5.6.3.1 – Descrizione delle apparecchiature di prova

L’apparecchiatura utilizzata, secondo la **EN 12697-26**, è il MatTa, composta da una struttura di carico, un’unità pneumatica, un sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati e una cella climatica con controllo della temperatura

Fig.5.38 - Foto del MatTa presso il *DICAM – Strade*

La struttura è costituita da una base (Figura 5. 39.a), da due montanti verticali (Figura 5. 39.b), da una trave di contrasto orizzontale (Figura 5. 39.b) e da un attuatore pneumatico collegato ad un pistone per l’applicazione dei carichi verticali (Figura 5. 39.b).

Collegata al pistone vi è una cella di carico che trasmette le sue misure all’unità di controllo e acquisizione dati (Figura 5. 40). La posizione della trave di contrasto può essere regolata a piacimento, purché sempre livellata e fissata saldamente, mediante serraggio manuale di dadi e controdadi zigrinati presenti su entrambi i montanti.

La forma dell’impulso di carico, descritta dal suo *“rise-time”*, dipende dal controllo operato in continuo dalla cella di carico e dalla compressibilità dell’area presente all’interno dell’attuatore pneumatico il quale, tramite un pistone consente l’applicazione di forze verticali. La deformazione orizzontale, derivante da tali impulsi, viene misurata attraverso appositi LVDT collegati al sistema computerizzato che li registra ed in relazione ai carichi applicati determina il modulo di rigidezza.

Fig.5.39 - In figura a base di appoggio provini, in figura b elementi della struttura di carico

L'unità pneumatica è formata da una serie di elementi collegati tra loro da tubi in plastica e connessioni ad innesto rapido. L'aria entra quindi nell'attuatore di carico attraverso una valvola solenoidale che si apre e si chiude a seconda delle necessità.

L'unità di controllo e acquisizione dati fornisce energia elettrica agli organi di controllo e permette di gestire la prova direttamente dal computer attraverso un software.

Fig.5.40 - Unita di controllo

5.6.3.2 – Preparazione del provino ed esecuzione del test

La fase di allestimento del provino è preceduta da una fase di taglio, nella quale i campioni sono avvolti in un giro di nastro isolante e suddivisi a metà mediante mola circolare, in maniera tale da ottenere da uno solo, due nuovi provini per un totale di 17 (alcune metà sono state scartate non essendo in condizioni ottimali).

La **UNI EN 12697-24** stabilisce che per provini da sottoporre a test ITFT debbano avere un diametro di 150 mm e un'altezza di almeno 60 mm.

Fig.5.41 - Fase di taglio per mezzo di mola circolare

Dopo un condizionamento di alcune ore in camera climatica a 20°C, il provino viene collocato trai due coltelli di carico e gli LVDT vengono inseriti in un supporto metallico fissato, per la misurazione degli spostamenti.

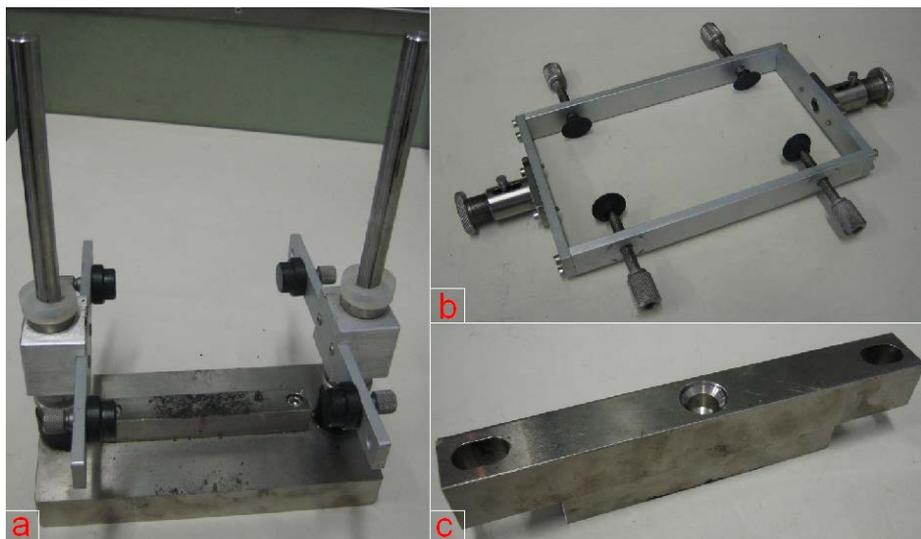



Fig.5.42 - Figura *a* coltello inferiore, in *b* coltello di carico superiore, in *c* supporto per posizionamento LVDT

Una volta sistemato il provino nell'apposito telaio e quest'ultimo sotto il pistone di carico, inseriti nel computer i parametri che definiscono il carico e le dimensioni del campione, si da inizio alla prova.

La prima fase della prova è caratterizzata dagli impulsi di condizionamento che possono variare in numero, generalmente se ne usano da 5 a 10. L'unità di controllo ne controlla la forza affinché si abbiano i 5 μm di deformazione orizzontale operando una serie di loop di taratura. Questi permettono quindi di individuare il carico da applicare affinché il campione subisca la deformazione orizzontale precedentemente fissata ed inoltre favoriscono l'assestamento delle strisce di carico sulla superficie del campione.

Nella seconda fase avviene la misurazione del Modulo di rigidezza (ITSM) e del modulo di rigidezza aggiustato (ITSM adjusted). In questo momento la macchina fornisce 5 impulsi sul campione che saranno caratterizzati da un peak load calcolato nella fase precedente, un pulse repetition period ed un rise time costanti e pre-inseriti nel software al momento dell'inizio della prova.

Pulse No.	Force (load) (N)	Peak Hor Deform'n (μm)	Adj Stiff Modulus (MPa)	RiseTime 0__peak (ms)	LoadTime 0__0 (ms)	LoadArea Ratio (%)	Stiffness Modulus (MPa)
1	2230.0	4.893	5190	124	201	58	5254
2	2227.1	4.893	5183	124	202	58	5247
3	2212.4	5.04	4999	124	200	58	5061
4	2235.8	5.069	5023	124	201	58	5085
5	2259.3	5.128	5018	124	199	58	5080
mean	2232.9	5.005	5083	124.0	200.6	58.019	5145
SD	15.283	0.095	84.97	0.0	1.019	0.0443	86.26
CV%	0.6844	1.902	1.671	0.0	0.508	0.0764	1.676

Fig.5.43 - Esempio di schermata

La misurazione dei moduli deve essere fatta almeno in due direzioni ortogonali e affinché i risultati possano essere considerati validi non dovranno differire di più del 10% e meno del 20% dal loro valore medio. In questo elaborato si è deciso anche di studiare la sensibilità termica delle miscele valutando i moduli per tre differenti temperature (10,20 e 30 °C) dopo circa 90 giorni di maturazione.

5.6.3.3 – Analisi dei risultati

Nella tabella 5.16 sono riportati i valori dei Moduli di Rigidezza ITSM per numero di provino, miscela e temperatura di esecuzione.

Nome Provino	Modulo ITSM (Mpa)		
	10 °C	20 °C	30 °C
RRE_180_1 a	7089,0	5341,5	4657,5
RRE_180_1 b	6332,0	4640,5	4286,5
RRE_180_2 a	8963,0	7007,5	5733,0
RRE_180_2 b	9847,5	6721,0	5649,5
RRE_180_4 a	7126,5	5574,5	5046,5
RRE_180_4 b	8880,5	6257,0	4042,0
RREP_120_2 a	5258,3	4893,5	4140,5
RREP_120_2 b	7353,0	4678,0	4176,5
RREP_120_3 a	5278,0	4760,0	3699,7
RREP_120_3 b	4971,5	4741,5	3990,0
RREP_120_4 a	7123,7	6660,5	5825,5
RREP_180_1 a	12578,0	9055,5	8034,0
RREP_180_1 b	12211,3	10110,0	9124,5
RREP_180_4 a	8659,5	6453,5	5874,0
RREP_180_4 b	9713,5	6954,7	6144,5
RREP_180_6 a	14715,7	9663,3	9735,0
RREP_180_6 b	9850,0	7609,7	7419,0

Tab.5.16 - Valori dei Moduli ITSM per RRE 180, RREP 180 e 120

Per effettuare una valutazione più rapida si può fare riferimento ai valori medi per miscela e numero di giri per il confezionamento, il colore verde indica la miscela contente polverino di gomma confezionata a 180 giri di Pressa Giratoria, il blu la medesima confezionata a 120 giri e il rosso quella priva di polverino sottoposta a 180 giri di compattatore giroscopico (Fig.5.44).

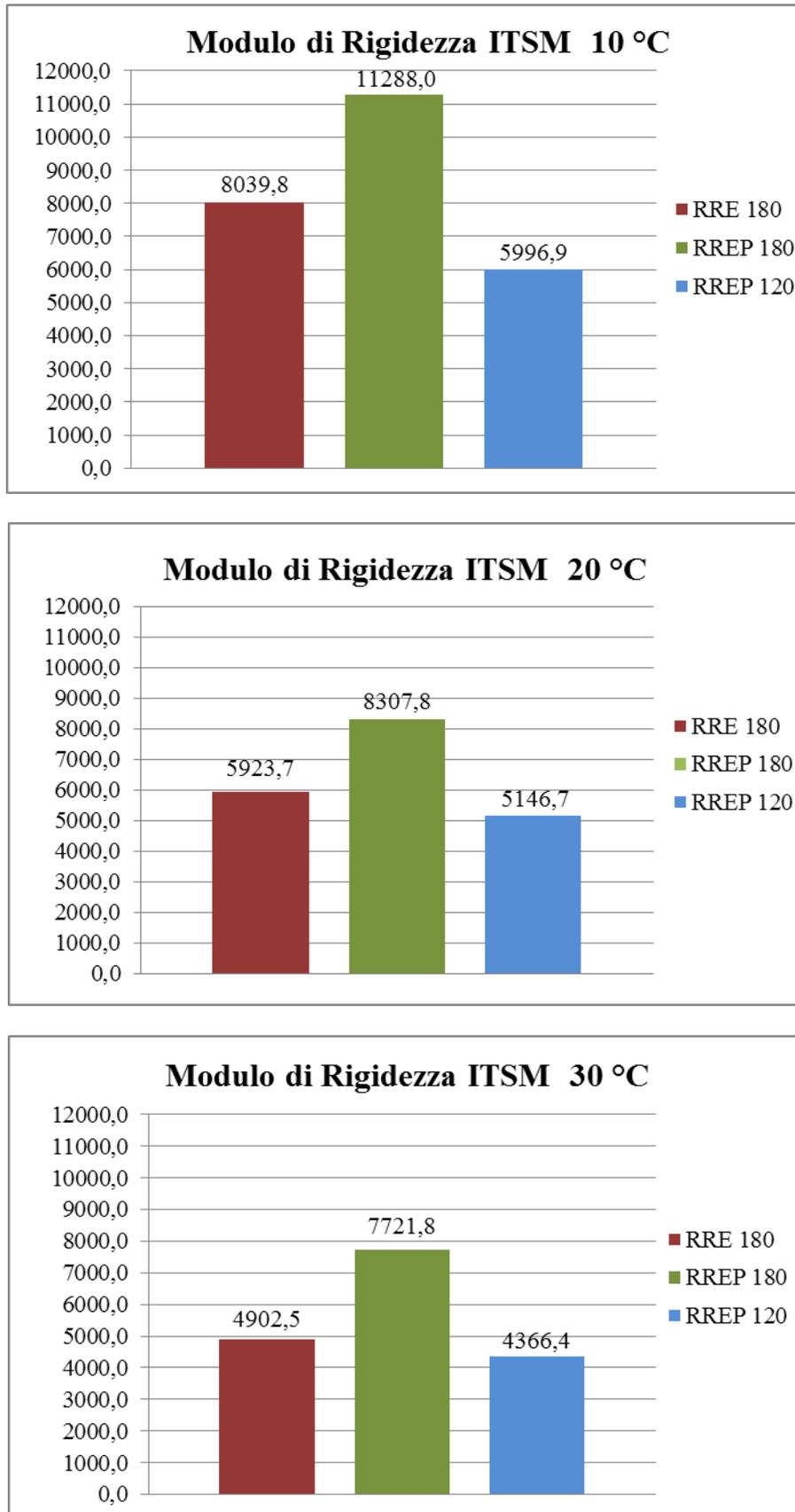



Fig.5.44 - Valori medi dei Moduli di Rigidezza ITSM per tipologia di miscela alle temperature di 10, 20 e 30 °C

I valori del modulo ITSM nei provini contenenti polverino di gomma confezionati a 180 giri sono più alti rispetto quelli senza, sia a 10 a 20 che 30 °C. Così come si era potuto osservare nelle prove ITS (paragrafo 5.6.2) anche in questo caso il materiale contenente gomma presenta delle caratteristiche di rigidità superiori. Le motivazioni di ciò, sono state affrontate in precedenza e sono legate probabilmente alle condizioni di stesa del Misto cementato privo di polverino, il quale ha esplicato valori sia in modulo ITSM, che di tensione di resistenza ITS inferiori, sebbene esso sia generalmente un materiale più rigido.

Sebbene non sia rigoroso, è possibile effettuare un confronto con i provini contenenti gomma a 120 giri, i quali sicuramente per ragioni di modalità di compattazione, esplicano valori in modulo inferiori rispetto la miscela tradizionale, così come i valori delle tensioni a rottura per ITS già visionati precedentemente.

Come già detto i valori dei moduli ITSM sono stati determinati alle temperature di 10, 20 e 30 °C, è possibile riportare i valori medi dei moduli in relazione alla temperature di esecuzione come nel grafico di figura 5.45.

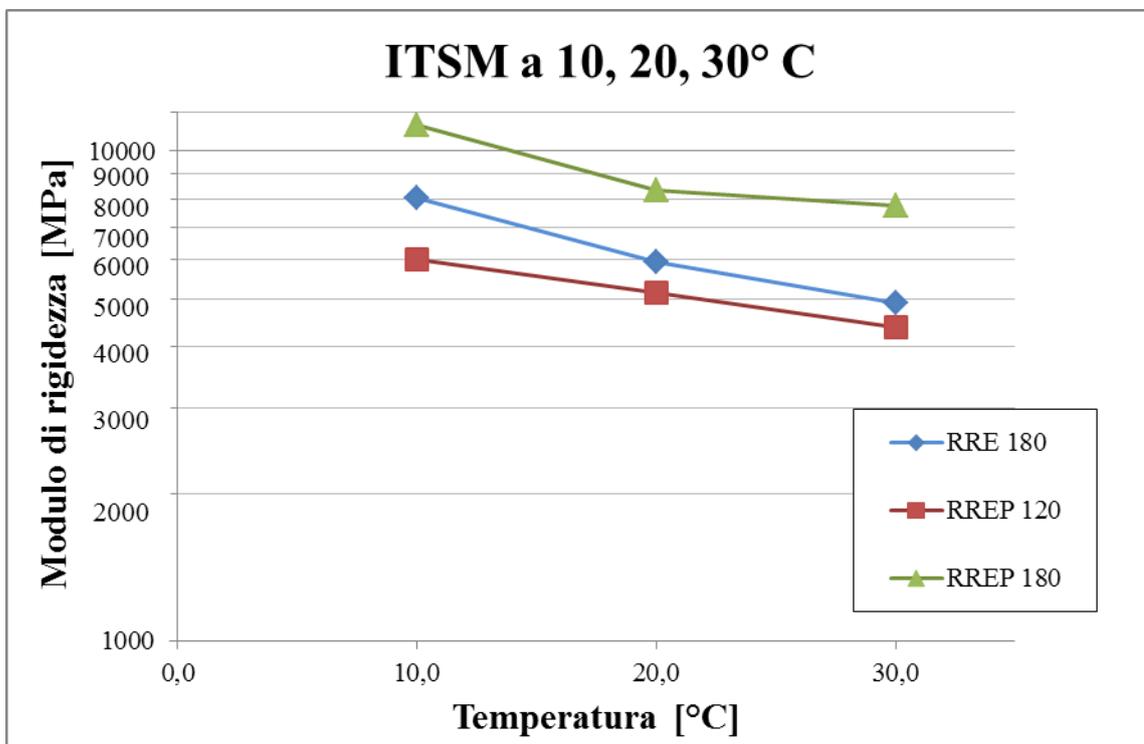



Fig.5.45 - Sensibilità termica con ITSM a 10,20 e 30 °C

I valori dei modulo sono più alti sono in corrispondenza di temperature di esecuzione di prova più basse, nelle quali il materiale risulta più rigido, un innalzamento delle temperature invece, provoca un rammollimento del materiale restituendo valori in modulo inferiori.

Dunque il valore dei moduli, per la miscela con polverino confezionata a 180 giri risulta superiore di quella senza, tuttavia la cosa interessante da analizzare è come la variazione in termini assoluti del modulo ad ogni temperature sia più o meno regolare per tutte le miscele in esame.

Si può infatti osservare come la pendenza delle rette sia più meno uguale in tutti e tre i casi, questo vuol dire che il gap tra i moduli si mantiene costante e dunque che il polverino non risente della variazione di temperatura.

5.7 – Valutazione dell'omogeneità di stesa

5.7.1 – Introduzione

Terminata la fase di analisi in laboratorio ,si è voluta in fine valutare la bontà della stesa effettuando prove di portanza con l'utilizzo di due tipologie di apparecchi LWD: Dynatest e Zorn.

Si ricordi la suddivisione del campo prova:

- 80 m Misto Cementato ad Alta Flessibilità con Polverino
- 40 m Misto Cementato ad Alta Flessibilità senza Polverino

Sono state dunque individuate 6 sezioni con interasse 10 m nel tratto contenete PFU, 2 sezioni sempre con interasse 10 m nel tratto a materiale "tradizionale" e 1 sezione definita intermedia, caratterizzata da un tratto misto. Per ognuna sono state effettuate 3 prove considerando la mezzeria e i bordi, lasciando circa 1 m dal ciglio destro e sinistro, con un totale di 27 punti di controllo per tipologia di LWD.

5.7.2 – La portanza

La sovrastruttura stradale è la struttura interposta fra i pneumatici dei veicoli stradali e il piano di posa della stessa. Le funzioni fondamentali della sovrastruttura sono:

- Formare una struttura stabile e poco deformabile, in grado di sopportare nel tempo le azioni di carico prodotte dai veicoli;

- Garantire la sicurezza della circolazione mediante una sufficiente regolarità ed aderenza della sua superficie;
- Ridurre le tensioni trasmesse al sottofondo, le cui scarse caratteristiche meccaniche permettono l'instaurarsi di deformazioni insostenibili per la sovrastruttura stessa.

La sovrastruttura stradale è in genere formata da una sovrapposizione di strati, costituiti da materiali di caratteristiche fisiche e meccaniche diverse, scelti in base alla funzione che dovranno assolvere all'interno della struttura stessa e a seconda del tipo di sollecitazione a cui verranno sottoposti nel corso della vita utile dell'opera. Va inoltre ricordato che in base alla geometria, se la pavimentazione è posta ad una quota superiore rispetto al piano di campagna l'infrastruttura si dice realizzata in rilevato; se, invece, la sovrastruttura si trova al di sotto di tale piano si parla di opera in trincea.

Si definisce *portanza o capacità portante* di un terreno o di uno strato, il rapporto tra il carico applicato e il cedimento corrispondente nello stesso.

Il controllo delle caratteristiche di portanza avviene una volta che la lavorazione è stata completata ed i materiali idonei, opportunamente scelti per la costruzione, sono stati posati e addensati in opera in maniera opportuna. Sia nel caso di opera in rilevato che di opera in trincea, per garantire la funzionalità dell'opera, è necessario procedere alla verifica delle caratteristiche portanti in corrispondenza di determinati punti della struttura stessa, comprendendo fra questi il piano di posa del rilevato, il piano di posa della pavimentazione ed, eventualmente, lo strato di fondazione.

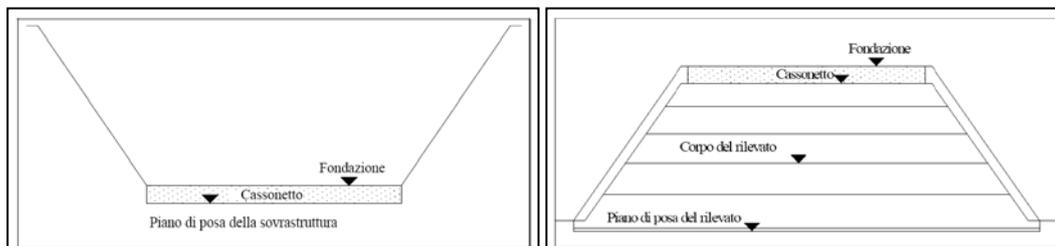



Fig.5.46 - Punti relativi ad una pavimentazione stradale in trincea e ad un'opera in rilevato, in cui possono essere condotte le prove di portanza ed addensamento

5.7.3 – Prove di portanza in sito

5.7.3.1- Prova di Carico Statica su Piastre (PLT)

La prova di carico statica su piastra tradizionale consiste nel sovraccaricare per intervalli di pressione successivi e regolari denominati cicli di carico, una piastra circolare rigida appoggiata sulla superficie del punto di prova, misurando i cedimenti corrispondenti ad ogni ciclo di carico tramite comparatori centesimali. Si determina il *Modulo di deformazione* M_d che fornisce una misura convenzionale della capacità portante dei terreni di sottofondo, degli strati di rilevato, nonché degli strati non legati e legati di fondazione e di base delle pavimentazioni stradali e non. Tale modulo, espresso in MPa, è definito dalla relazione:

$$M_d = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot d$$

Dove:

– d: diametro della piastra (mm);
– Δp: incremento della pressione trasmessa alla piastra (MPa);
- Δs: corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata (mm).

Il Modulo di deformazione M_d può essere quindi utilizzato in alternativa al *Modulo elastico E (modulo di Young)* per esprimere la rigidezza dei materiali; risulta comunque possibile, introducendo il coefficiente di Poisson (ν), ricondurre un Modulo all’altro per mezzo della seguente relazione valida in caso di piastra flessibile:

$$M_d = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

Eguagliando le due formule ed esplicitando il Modulo elastico E si ottiene:

$$E = q2r \cdot \left[\frac{1-\nu^2}{s}\right] = \frac{q}{s} \cdot d \cdot (1 - \nu^2)$$

Tale formula è prevista dalla teoria dell'elasticità di *Boussinesq* nel caso di piastra circolare infinitamente flessibile, per la quale possa assumersi una distribuzione uniforme della pressione di contatto. E′ importante rilevare che nella relazione sopra riportata non si fa riferimento ad un carico staticamente distribuito, ma ad un intervallo Δp (e quindi ad un intervallo di cedimenti Δs), il carico infatti non è costante bensì viene progressivamente incrementato secondo quanto prescritto dalla norma CNR BU 146, 1992.

Nel caso in cui, invece, si consideri la piastra infinitamente rigida si avrà:

$$E = 0.758\ M_d(1 - \nu^2)$$

Come illustrato in Figura 1.3, l'apparecchiatura di prova consta essenzialmente dei seguenti elementi:

- Una piastra circolare d'acciaio di spessore non inferiore ai 20 mm e del diametro di 300 ± 1 mm;
- Un martinetto idraulico (di portata pari almeno a 50 kN) che contrasta con un carico fisso: questo può essere rappresentato da un rimorchio opportunamente zavorrato (sul cui asse posteriore gravi un carico almeno doppio di quello da esercitare sulla piastra) o, più semplicemente, da una piattaforma su cui è stato posto il carico; se il contrasto utilizzato è un autocarro occorre assicurarsi che la distanza tra i bordi della piastra e quelli dei pneumatici sia almeno pari a 0,5 m;
- Un anello dinamometrico per la misura del carico applicato;
- Uno o più comparatori centesimali per la lettura dei cedimenti, aventi capacità di misura pari a 10 mm e sensibilità di 1/100 di mm, posizionati sulla superficie superiore della piastra;
- Una traversa porta-comparatori, lunga almeno 2,5 m e posizionata sul terreno in modo tale che i punti d'appoggio non siano influenzati dalle deformazioni del terreno sotto carico.

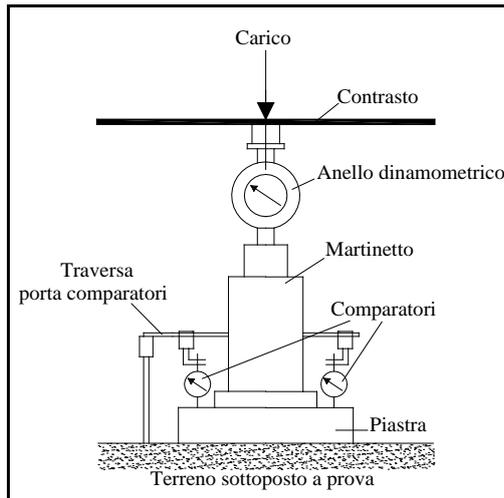



Fig.5.47 - Apparecchiatura PLT

La prova di carico statica su piastra può essere eseguita a ciclo unico o a ciclo ripetuto; in ambito stradale solitamente si utilizza il doppio ciclo di carico. Quest'ultima modalità di prova consente di determinare con il primo ciclo il modulo M_d, convenzionalmente indicativo della portanza, e con il secondo ciclo il modulo M_d' col quale, mediante il rapporto Md/M'd, è possibile valutare il grado di costipamento dello strato in esame.

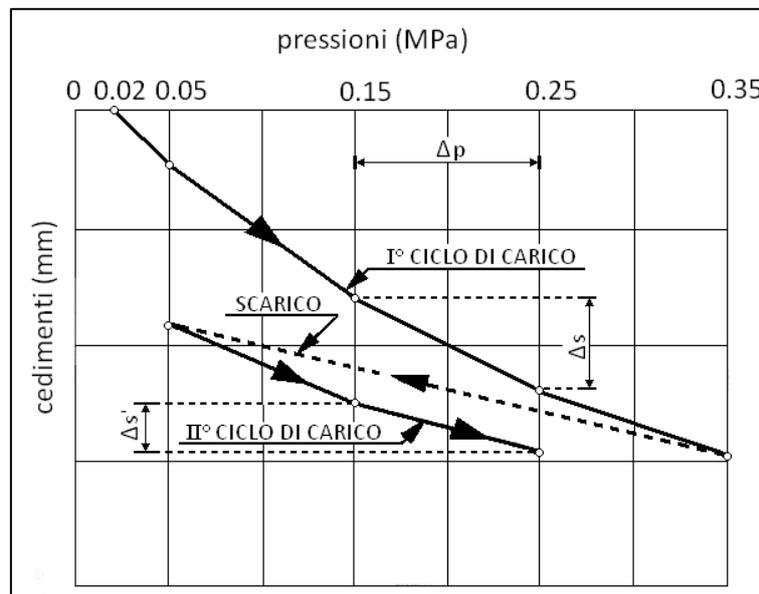



Fig.5.48 - Cicli di Carico di una prova PLT

Esistono diverse dimensioni della piastra di prova a seconda delle diverse condizioni d'esercizio della sovrastruttura. Generalmente per pavimentazioni stradali ordinarie vengono utilizzate piastre di 300 mm di diametro, ma nella pratica corrente non è raro l'impiego di piastre di altre dimensioni, con diametro variabile tra i 160 e i 760 mm.

La scelta del valore del diametro della piastra da utilizzare per la PLT è condizionata da diversi fattori:

- Effetto scala: il diametro della piastra viene scelto in funzione della dimensione massima degli aggregati utilizzati; deve essere rispettata la seguente relazione:

$$d \geq 3d_{agg}$$

- Profondità da esaminare: più è grande tale profondità, maggiore deve essere il diametro della piastra da utilizzare. Ciò è dovuto al fatto che le isobare relative ad una piastra di carico di piccolo diametro interessano, a parità di pressione applicata, spessori di sottofondo minori rispetto ad una piastra caratterizzata da dimensioni superiori. Il bulbo delle pressioni si estende ad una profondità maggiore se il diametro della piastra è elevato. Se, quindi, il terreno da analizzare risulta costituito da più strati di diversa natura, la prova di carico eseguita con una piastra di piccola estensione può fornire un risultato diverso da quella condotta con una piastra di diametro maggiore.
- Tipologia di sovrastruttura: il diametro della piastra varia anche in funzione del tipo di sovrastruttura che si vuole analizzare. Per opere stradali viene solitamente impiegata una piastra di diametro pari a 300 mm, mentre per prove condotte in ambito aeroportuale il diametro della piastra è in genere di 760 mm;
- In casi eccezionali la prova di carico su piastra può essere eseguita, oltre che in superficie, anche in pozzi profondi (rivestendo opportunamente le pareti), oppure sul fondo di fori di sondaggio.

5.7.3.2 – Falling Weight Deflectometer (FWD)

Tra i sistemi di misura della portanza ad alto rendimento, quello maggiormente conosciuto in Italia è il Falling Weight Deflectometer. Tale strumento è stato sviluppato negli anni '60 dalla Technical University of Denmark in collaborazione con il Danish Road Institute ed il Dynatest Group, al fine di realizzare prove non distruttive di portanza su pavimentazioni stradali e aeroportuali.

Fig.5.49 - Apparecchiatura per prova FWD

Anche in questo caso le prove possono essere condotte su strati non legati profondi così come su strati legati idraulicamente o con bitume; in particolare si è soliti eseguire il test sul piano viabile finito come forma di monitoraggio.

L'apparecchiatura di prova è montata su un carrello ad asse unico ed è costituita dai seguenti elementi:

- Una massa variabile da 1 a 3 kN che cade da un'altezza determinata in base alla sollecitazione a cui si vuole sottoporre la pavimentazione da analizzare (altezza variabile tra i 50 e i 390 mm);
- Una piattaforma di rilevamento connessa con la piastra di carico base per mezzo di una serie di molle;
- Una serie di trasduttori accelerometrici (generalmente 7 geofoni installati sulla piattaforma di rilevamento), di cui uno è collocato esattamente sotto la piastra di carico e gli altri si succedono fino a 2 m di distanza dal punto di impatto; essi sono in grado di misurare la deflessione sotto la piastra di carico ed il bacino di deflessione adiacente (Figura 1.7);
- Le unità di controllo e di acquisizione dati costituita da un personal computer installato a bordo del veicolo di traino.

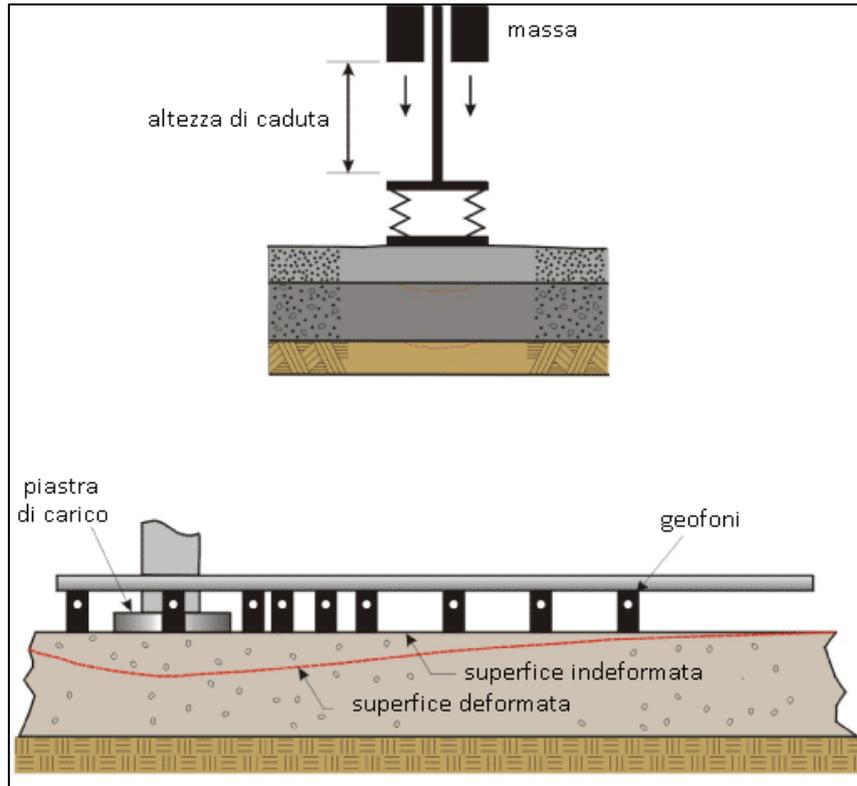



Fig.5.50 - Funzionamento prova FWD

5.7.3. 3 – Light Weight Deflectometer (LWD) Dynatest e Zorn

La prova di carico dinamica su piastra effettuata con la strumentazione LWD (Light Weight Deflectometer) si è sviluppata come strumento di verifica per determinare il Modulo dinamico di deformazione E_{vd} del terreno e dei materiali non legati. Questa viene utilizzata, nell'ambito di costruzioni stradali, ferroviarie e aeroportuali, per definire la capacità portante e il grado di addensamento di terreni di sottofondo e fondazione. Tali apparecchiature rilevano le deflessioni superficiali indotte da un carico di prova che simula l'effetto del traffico veicolare. Questa tecnologia si può definire "non distruttiva ad alto rendimento" e può essere affiancata alle più tradizionali note prove di carico su piastra (PLT), presentando però rispetto a queste ultime alcuni vantaggi. La determinazione della portanza con metodi tradizionali come la PLT limita fortemente il numero di prove/giorno e di conseguenza il numero di prove/superficie rispetto a tecnologie LWD. Di conseguenza tutto questo si ripercuote sul numero di valutazioni effettuabili e sull'affidabilità della valutazione ultima. È da notare poi che una prova di carico su piastra si avvale di un mezzo di contrasto (es. autocarro) e quindi ha necessità di ingombro notevoli del

piano di prova unitamente ad esigenze di buona accessibilità del sito. Tutte queste motivazioni hanno incoraggiato lo sviluppo di una tecnologia più versatile come il deflettometro portatile a massa battente.

In commercio esistono diverse apparecchiature del tipo LWD che si differenziano per la massa battente, l'altezza di caduta, le dimensioni della piastra di carico e la modalità di registrazione della deflessione superficiale utilizzata per il calcolo del modulo (geofono o accelerometro).

Nel nostro caso specifico sono state utilizzate due apparecchiature LWD: Dynetest e Zorn le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella che segue:

Descrizione	**LWD ZFG 2000 Zorn**	**DYNATEST LWD 3031**
Massa	10/15 kg	10/15/20 kg
Altezza di caduta	720 mm	Variabile, 0 ÷ 850 mm
Diametro della piastra	300 mm	150/200/300 mm
Spessore della piastra	20 mm	17 mm
Forza di picco	7.07/10.6 KN	Variabile, 0 ÷ >15 kN
Sensore di spostamento	Accelerometro ±2g ÷ ±500g Tensione di eccitazione 8 ÷ 36 Vdc	Geofono 0 ÷ 2200 μm Accuratezza 2% ± 1 μm Precisione 0.1 μm
Ulteriori sensori di spostamento	No	Si, fino a 2 geofoni aggiuntivi
Cella di carico	Non presente	0 ÷ 25 kN Accuratezza 2% ± 2 kPa Precisione 0.0003 kN

Tab.5.17 - Caratteristiche dei due strumenti

Fig.5.51 - LWD Zorn e LWD Dynests

Il principio di funzionamento del LWD è analogo a quello del Falling Weight Deflectometer tradizionale: una massa nota viene fatta cadere da un’altezza prefissata su una piastra di carico posizionata sul piano da analizzare. Il carico assume la forma di un impulso e le pressioni ed i cedimenti conseguentemente indotti nel suolo sono misurati e calcolati ad ogni colpo. Si applica un carico impattante sullo strato in esame attraverso una piastra circolare d’acciaio, considerata rigida (indeformabile). Il dispositivo di carico è costituito da una massa battente. Dopo essere stata liberata, la massa scorre lungo un’asta di guida fino a colpire uno smorzatore a molla di acciaio o di un materiale sintetico (gomma). Il dispositivo di carico si posa su una sfera di centraggio posta al centro della piastra. Così, solo le forze di compressione possono essere trasferite sulla piastra di carico. Un sensore al centro della piastra è collegato con un dispositivo di misurazione elettronica, in modo che i risultati delle operazioni di carico possano essere rilevati e stampati durante la prova.

Nel caso particolare del LWD Zorn, il processo di interpretazione dei dati si basa su un semplicissimo principio. Dopo l’esecuzione della prova, le accelerazioni misurate o le velocità, vengono integrate due o una volta rispettivamente, così da fornire la

deflessione massima della piastra. Tutti gli altri parametri richiesti per la determinazione dei moduli di deformazione dinamica vengono assunti costanti. Quest'approssimazione si è dimostrata ragionevole per terreni incoerenti caricati rapidamente. Gli elementi meccanici ed elettronici che compongono il dispositivo sono essenzialmente, una piastra di carico rigida, una massa battente e una apparecchiatura elettronica di acquisizione dati. La piastra in acciaio zincato del diametro di 300 mm e dello spessore di 20 mm, può essere considerata rigida ai fini del calcolo dei moduli del piano sottoposto a prova. Essa è dotata di una coppia di maniglie che ne facilitano il posizionamento e il trasporto. Tra la piastra di carico e la massa battente sono frapposti nell'ordine: un compensatore di inclinazione per condurre prove su piani inclinati, un accelerometro per la misurazione dei cedimenti, una cella di carico per la misurazione dei carichi in gioco e uno smorzatore a molle (buffer) per modulare la forza impattante. La cella di carico è sostanzialmente un trasduttore di forza dotato di otto estensimetri incorporati; il trasduttore accelerometrico è invece un sensore che fornisce un output proporzionale all'accelerazione misurata e che, posizionato al centro della piastra di carico e ortogonalmente ad essa, è in grado di fornire per integrazione del segnale captato, l'abbassamento del punto centrale della piastra, nonché la corrispondente velocità di deformazione del suolo. La massa impattante del peso di 10 kg (15 kg nel caso in cui i moduli previsti siano elevati) è libera di scorrere sull'asta di guida che, oltre a garantire la centralità del colpo, consente di uniformare l'altezza di caduta per mezzo della leva di rilascio fissata in corrispondenza dell'impugnatura.

Nel modello appena descritto, un cavo elettrico estensibile permette il collegamento diretto dell'apparecchiatura elettronica per l'acquisizione dei dati dotata di display e stampante. I risultati possono anche essere trasferiti tramite chip-card o porta seriale su personal computer.

Per quanto concerne lo strumento LWD Dynatest, esso è invece dotato di un sistema di acquisizione dati wireless. L'assenza del filo che collega il data recorder e lo strumento, rappresenta un vantaggio laddove sul piano indagato siano presenti altri operatori e il filo possa andare ad intralciare le altrui lavorazioni.

Le principali differenze sono così riassumibili: Zorn utilizza un accelerometro, collocato tra i suoi buffer e la piastra di carico, per misurare la deflessione della

piastra; Dynatest misura invece le deflessioni usando un geofono, direttamente in contatto con la superficie attraverso un piccolo foro al centro della piastra.

Il dispositivo Dynatest presenta un tappetino in gomma per distribuire lo stress di contatto sotto la piastra; una superficie piana di metallo è invece adottata da Zorn. Questa differenza può in qualche modo influenzare le misure, come suggerito in White et al. (2007).

Il dispositivo Zorn ha un'altezza di caduta fissa, con una forza nominale di picco (calibrata dal costruttore) pari a 7,07 kN per una massa di 10 kg, che diventa 10,60 kN per una massa 15 kg: queste forze sono quelle riferite al carico applicato al centro della parte superiore della piastra, carico assunto costante per il calcolo delle sollecitazioni verticali sotto la piastra.

Il dispositivo Dynatest, d'altra parte, include una cella di carico per la registrazione delle time histories degli impulsi effettivamente applicati sotto la piastra. Ciò consente di applicare un impulso specifico impostando l'altezza di caduta a seconda del tipo di strato indagato.

L'impulso di carico è applicato con differenti curve di carico: la curva Zorn ha un'onda che cade in un periodo di circa 16-18 ms, mentre quella Dynatest è di 25-30 ms (Fritz Kopf).

5.7.3.4 – Calcolo del modulo E_{LWD}

E' noto come il modulo di deformazione restituito dai dispositivi LWD (E_{LWD}) sia calcolato a partire dal modello di semispazio elastico, dai valori di deflessione e di tensione di contatto della piastra. Tuttavia, nonostante le stesse ipotesi, metodologie e operazioni simili, la maggioranza dei dispositivi restituisce valori diversi anche a parità di condizioni iniziali. Abbiamo che l'applicazione di un carico concentrato verticale ad una superficie orizzontale di qualunque solido produce una serie de tensioni verticali negli strati orizzontali del corpo. L'intensità di queste tensioni verticali in queste regioni decresce a partire de un massimo nel punto situato al disotto del carico (punto di contatto) fino a zero a distanza maggiore da questo punto. Le tensioni applicate causano una deformazione immediata, la cui intensità dipende dalle caratteristiche di rigidezza flessionale del mezzo a contatto col terreno. In base alla soluzione elastica di Bousinnesq, la relazione tra le tensioni applicate e

la deflessione della superficie, nel caso di una piastra di contatto rigida o elastica a contatto con un semispazio elastico, vale:

$$E = \frac{(1 - v^2)\, \sigma_0\, a}{d_0}\, f$$

Dove:

- d_0 = deflessione misurata
- σ_0 = tensione applicata
- v = modulo di Poisson
- a = raggio della piastra
- f = fattore di forma

Tutti i dispositivi LWD utilizzano la teoria appena esposta, per il calcolo del modulo E_{LWD} restituito, basandosi sui valori misurati o assunti di tensione di contatto e il picco di deflessione della piastra o del suolo immediatamente a contatto con il centro della piastra. Alcuni dispositivi permettono inoltre la selezione del *fattore di forma* da utilizzare, mentre altri ne assumono un valore costante (pari a 2). In generale comunque, la distribuzione di tensioni al disotto della piastra dipende dalla rigidezza della piastra stessa non che dalle caratteristiche della superficie investigata. Si riporta in Tabella 1.2 un sommario delle distribuzioni di tensioni, caratteristiche del suolo e fattore di forma di riferimento.

Piastra	Materiale	Distribuzione delle tensioni		Fattore di forma (f)
Rigida	Ghiaia (materiale elastico)	Parabolica inversa		π/2
Rigida	Sabbia, non coesiva	Parabolica		8/3
Rigida	Materiale con caratteristiche intermedie	Uniforme / Parabolica inversa		da π/2 a 2
Flessibile	Ghiaia (materiale elastico)	Uniforme		2
Flessibile	Sabbia, non coesiva	Parabolica		8/3

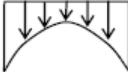
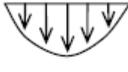
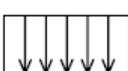
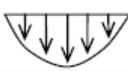



Fig.5.52 - Fattori di forma più utilizzati

Esistono inoltre diversi fattori in grado di influenzare il valore del modulo E_{LWD} tra cui:

- *DIMENSIONI DELLA PIASTRA DI CONTATTO*

A parità di altre condizioni si riscontra in bibliografia, una correlazione negativa tra le dimensioni della piastra di contatto e il valore del modulo E_{LWD}: a piastre di dimensioni minori è associato un E_{LWD} maggiore. Ad esempio, Deng-Fong et al. (2006) ha condotto studi sull'influenza delle dimensioni della piastra di contatto sul valore E_{LWD} utilizzando un dispositivo LWD PRIMA con piastre di dimensioni diverse: il valore del modulo E_{LWD} stimato attraverso un dispositivo LWD avente piastra di contatto di diametro 10 mm, risulta quindi essere 1.5 volte maggiore di quello ottenuto a parità di altre condizioni con una piastra di diametro 300 mm. Chaddock and Brown (1995) utilizzando il dispositivo LWD TFT, hanno dimostrato che il valore riscontrato attraverso una piastra di 200 mm risulta tra 1.3 – 1.5 volte maggiore di quello ottenuto attraverso una piastra di 300 mm.

- *INTENSITA' DELLE TENSIONI DI CONTATTO*

Esistono informazioni contrastanti in bibliografia sulla relazione tra tensione di contatto della piastra e modulo E_{LWD} corrispondente. Fleming et al. (2000) utilizzando i dispositivi LWD PRIMA e TFT riporta che un aumento delle tensioni di contatto da 35 kPa a 120 kPa ottenuto alterando l'altezza di caduta del peso nei dispositivi, porta nel modulo del PRIMA $E_{LWD\text{-}P3}$ un aumento del 15%, mentre nel modulo del TFT $E_{LWD\text{-}T3}$ un aumento del 33%. D'altra parte Deng-Fong *et al.* (2006) riporta che il valore del modulo del dispositivo PRIMA non viene influenzato dall'entità delle tensioni di contatto nei casi da lui investigati. Altri studi riportano risultati analoghi ai 2 qui presentati.

- *TIPOLOGIA E POSIZIONE DEL SENSORE DI DEFLESSIONE*

Nei dispositivi LWD si riscontra un influenza sul valore del modulo E_{LWD}, da parte del tipo di sensore di deflessione nonché la posizione in cui montato (sulla piastra - a diretto contatto con il terreno). Fleming *et al*. (2002) indica che un trasduttore di

deflessione montato sulla piastra registrerà anche l'accelerazione inziale della piastra stessa computandola nel calcolo del modulo di deformazione, al contrario invece di uno posizionato a diretto contatto col materiale che non registrerà tale accelerazione. Di conseguenza, dai dispositivi LWD che misurano la deflessione nella piastra (come Zorn, ad esempio) ci si aspetta valori del modulo E_{LWD} maggiori a parità di altre condizioni, di quelli riscontrati utilizzando dispositivi che utilizzano trasduttori a contatto col suolo (Keros, Prima, e TFT).

- *RIGIDEZZA DELLA PIASTRA*

Abbiamo visto che la distribuzione delle tensioni al di sotto della piastra di un dispositivo LWD dipende sia dal rigidità della piastra che dal tipo di superficie (vedi Tabella 1.3).
E' però necessario chiedersi quando è possibile caratterizzare una piastra come rigida o non sia possibile farlo. In quanto, una piastra rigida non presenta deflessione quando caricata. Infatti i diversi produttori di dispositivi LWD, producono piastre di diverso spessore e materiale che ovviamente si ripercuote nella rigidezza del dispositivo. Risulta quindi necessaria una chiara conoscenza della rigidezza della piastra di ciascun dispositivo LWD, per la scelta del fattore di forma corretto nel calcolo di $E_{LWD.}$

- *VELOCITA' D'APPLICAZIONE DEL CARICO*

Utilizzando la teoria elastica per la stima di E_{LWD} si considerano equivalenti la massima deflessione sotto l'azione del carico battente, cioè un'azione dinamica, e la deflessione massima relativa ad una piastra identica sotto azione di un carico statico della stessa intensità. Tuttavia, alcuni studi indicano una correlazione tra velocità di caduta e $E_{LWD.}$

5.7.4 – Analisi dei risultati

Nello schema in basso sono visibili il numero di sezioni per ognuna delle quali sono state eseguite 3 prove per tipologie di LWD per un totale di 27 punti di controllo a strumento. La valutazione che si vuole fare non è tanto sul valore in se dei moduli, quanto sull'omogeneità della stesa e quindi sul valore che mediamente questi hanno su tutta la superficie esaminata.

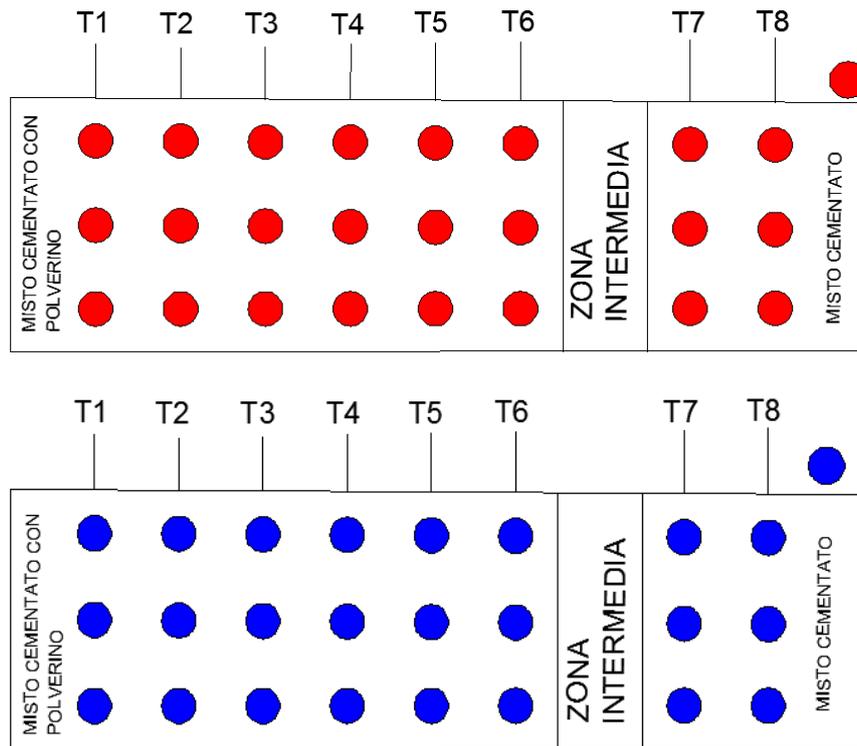



Fig.5.53 - Punti di controllo sulla stesa, in rosso Dynatest e in blu Zorn

In tabella 5.18 sono riportati i valori dei moduli E_{LWD} per lo schema adottato, le misurazioni sono state eseguite circa 10 giorni dopo la stesa, la temperatura al momento della prova era di circa 2°C, secondo la procedura ANAS con massa da 10 Kg per LWD Dynatest e da 15 kg per lo Zorn.

		MISTO CEMENTATO CON POLVERINO						SEZ. MISTA	MISTO CEMENTATO	
	Sez /Pt.o	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**		**T7**	**T8**
E_{LWD} **Dynatest (10 Kg)**	**a**	1300	1153	932	1034	1156	1151	878	870	886
	b	1006	1327	906	910	1098	1296	703	1020	1090
	c	929	935	976	1013	1103	912	626	870	670
E_{LWD} **Zorn (15 Kg)**	**a**	266	177	204	121	155	196	122	161	171
	b	162	168	238	315	168	241	183	124	220
	c	160	197	231	189	216	246	160	163	203

Tab.5.18 - Valori dei moduli ELWD con Dynatest e Zorn

Per ognuna delle sezioni T1, T2, T3 etc. sono indicati tre valori a, b, c del modulo relativi al punto di presa rispettivamente lato sinistro, mezzeria e lato destro per ognuno dei due LWD, in rosso Dynatest e in blu Zorn.

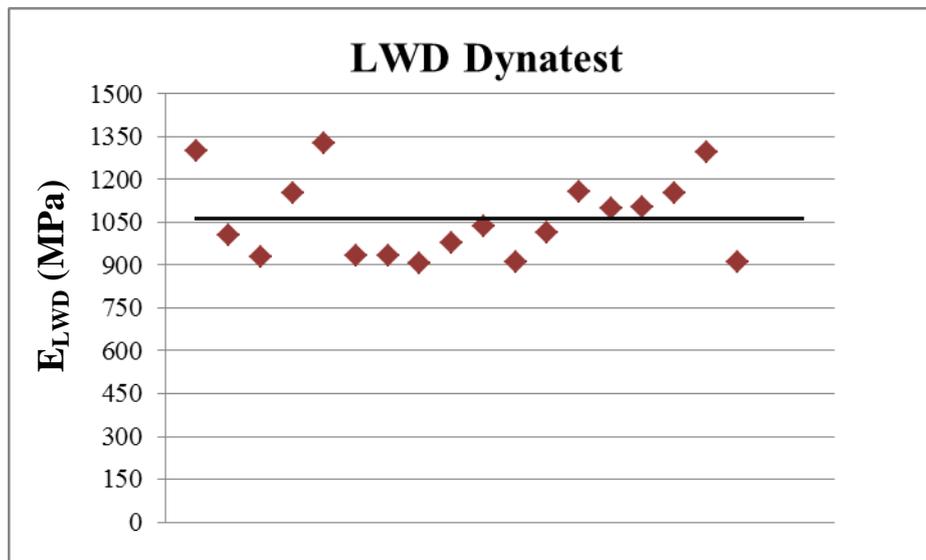



Fig.5.54 - Dispersione valori ELWD attorno il valore medio determinati con Dynatest

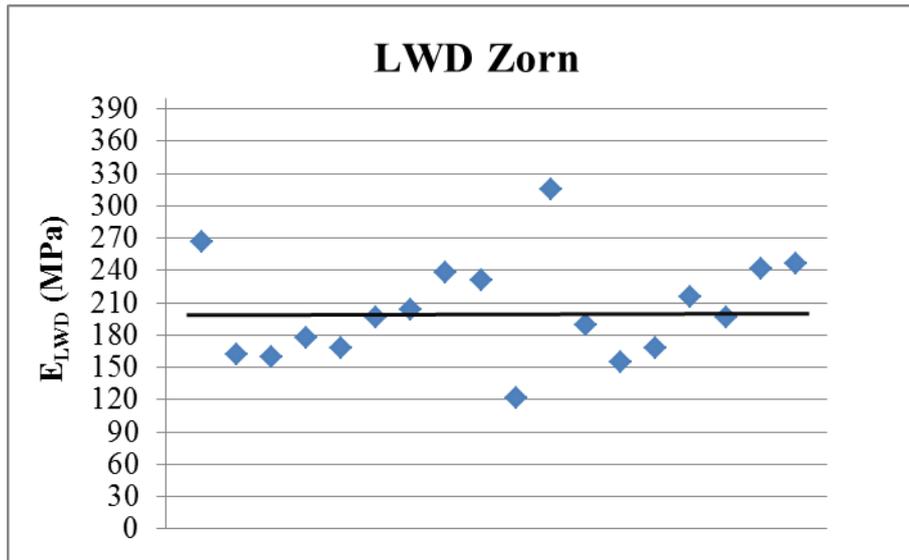



Fig.5.55 - ispersione valori ELWD attorno il valore medio determinati con Zorn

In figura 5.54 e in figura 5.55 sono rappresentate le dispersioni dei moduli attorno al valore medio nelle due tipologie Dynatest e Zorn dove, in entrambi i casi, i punti sono molto poco dispersi.

In figura 5.56 invece i punti rappresentati sono definiti da una coppia di coordinate x,y, i cui valori sono rispetivamente modulo Dynatest e modulo Zorn. Viene così definita una nuvola di punti molto concentrata, il che vuol dire che in sostanza si ha una buona omogeneità del dato su tutta la superficie.

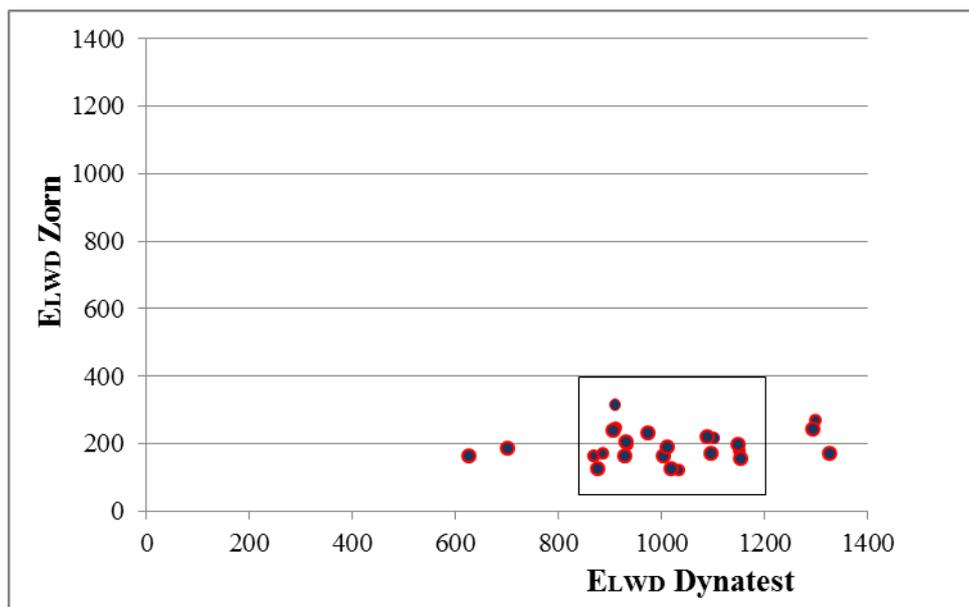



Fig.5.56 – Rappresentazione omogeneità valore moduli

Infine si è voluto rappresentare l' andamento dei moduli nelle sezioni in progressione (Fig.5.7).

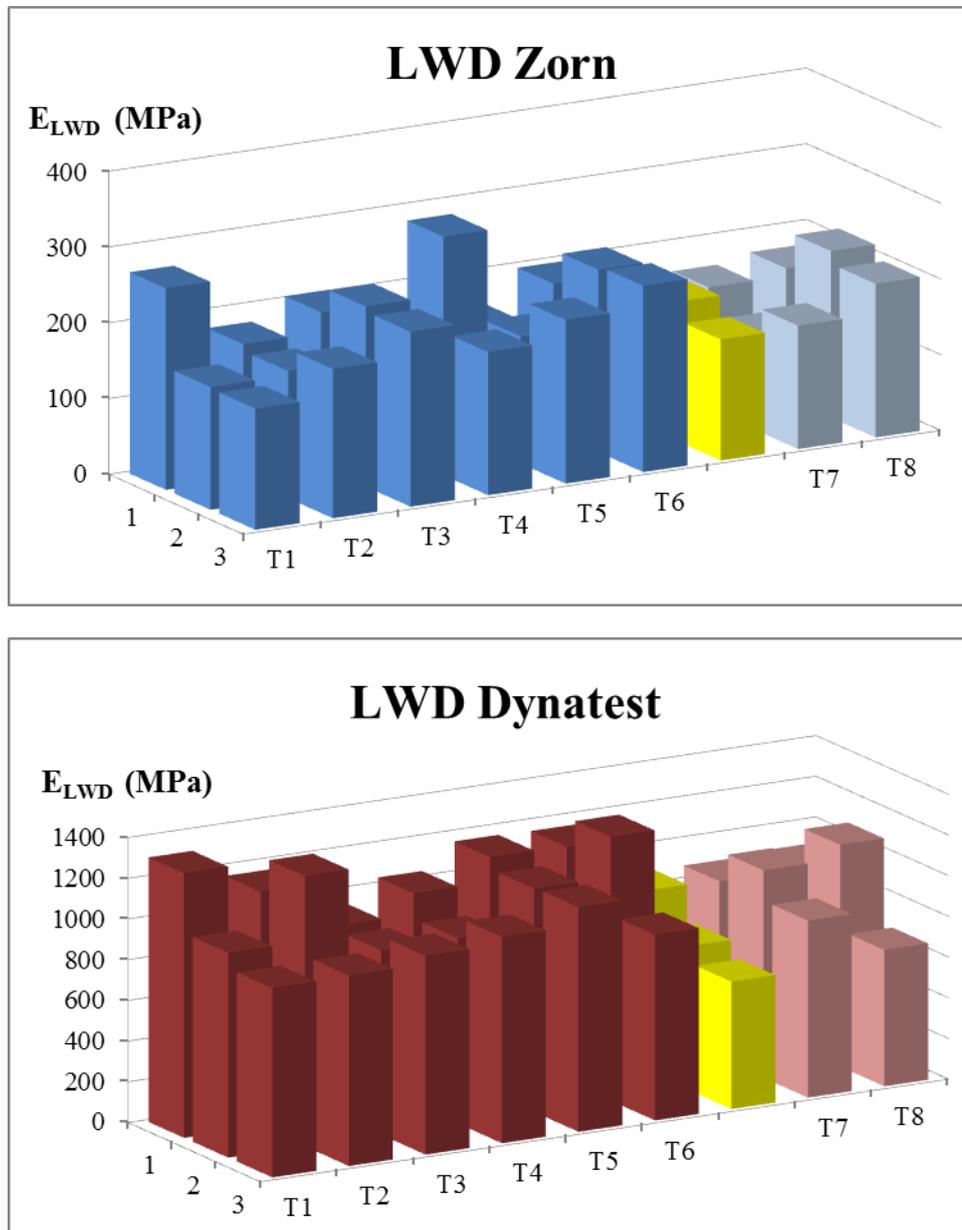



Fig.5.57 - In alto andamento degli ELWD determinati con l'apparecchiatura Zorn , in basso invece quelli mediante LWD Dynatest

Si noti come sia presente una buona omogeneità di stesa soprattutto nella parte centrale, ovvero dalla sezione 2 alla 6 nella quale non si riscontrano grosse discontinuità; man mano che ci si avvicina allo strato intermedio nel quale c'è una contaminazione del materiale il valore del modulo scende.

I valori discordanti sono dunque all'inizio della stesa quando il materiale è contaminato da quello di riporto e all'interfaccia tra i due. Questo è possibile verificarlo ulteriormente nel grafico di Fig.5.56, nel quale si possono individuare i punti al di fuori della nuvola considerata e relativi ai valori dei due moduli (Dyna e Zorn) per sezione e punto di controllo.

Nel tratto costituito dal Misto Cementato senza polverino si riscontra nuovamente una buona omogeneità; anche in questo caso però, come già si è verificato per i valori di rottura per ITS e per quelli del modulo ITSM, anche i valori di modulo LWD sono più bassi, probabilmente per le problematiche riscontrate in fase di stesa e già enunciate precedentemente.

Conclusioni

Il problema dei rifiuti non degradabili in combinazione con l'aumento della popolazione costituisce un problema serio e di non facile risoluzione, lo smaltimento di tali composti è spesso costoso e costituito da un iter complicato, in oltre, come se non bastasse all'aumento del trasporto su gomma segue una sempre più scarsa reperibilità delle materie prime.

La chiave di volta di tutte queste problematiche è il "riciclaggio", il riutilizzo di rifiuti C&D nelle opere civili, è un fenomeno che negli ultimi anni sta prendendo sempre più piede, grazie anche alle università e ai centri di ricerca. In campo stradale fondamentale è il ruolo del fresato, il quale è in grado di conferire caratteristiche di elasticità agli strati in cui è impiegato, in virtù della componente bituminosa che porta con sé.

In particolare le tecniche di riciclaggio a freddo del fresato consentono di realizzare grazie a leganti bituminosi a freddo e ad additivi un conglomerato dalle caratteristiche simili a quelle proprie di uno ottenuto tradizionalmente. Il vantaggio del processo risiede nel non dover ricorrere ad energia termica con postivi risvolti ambientali ed economici.

Gli pneumatici costituiscono da sempre un problema in termini di una corretta gestione del loro smaltimento, necessario in seguito al raggiungimento di fine vita utile degli stessi. Alla luce delle numerose problematiche riscontrate nel perseguire questo intento, un loro possibile recupero come materia prima seconda (MPD) in taluni strati delle pavimentazioni, si configurerebbe come un passo importante verso l'intento comune a livello europeo, di ridurre le quantità avviate a discarica, già molto consitenti.

Nella sperimentazione oggetto della presente tesi è stata valutata la possibilità di inserimento del polverino di gomma derivante da frantumazione di PFU, in una miscela confezionata a freddo, valutando i possibili vantaggi in termini di capacità di addensamento e resistenza meccanica tramite ITS e ITSM.

Sono state così confezionate due miscele, costituite una con 3% di emulsione bituminosa, 3,5% di cemento e 1,5% di polverino e, l'altra con le medesime percentuali (in volume) di emulsone e cemento, ma con lo 0% di rubber.

La ricerca si è articolata dunque in due fasi, una di prequalifica in laboratorio e una di studio del comportamento del materiale in sito.

Nella fase di prequalifica del materiale, sono state studiate le due miscele attraverso il Mix Design, la compattazione con pressa giratoria a 180 giri, per la valutazione della capacità di addensamento e la determinazione della resistenza dei provini confezionati, a trazione indiretta.

Presso il campo prova situato nei pressi della nuova rotatoria sud della Lungosavena, nel comune di Castenaso della provincia di Bologna invece, si è studiato il comportamento del materiale in stesa, composta da 80 m di misto cementato con polverino e 40 m senza.

Sono stati dunque confezionati provini con pressa giratoria a 120 e 180 giri (tramite Laboratorio mobile e Laboratorio *DICAM – Strade*) per lo studio della capacità di addensamento. La valutazione delle caratteristiche di resistenza è stata effettuata mediante test ITS a 25°C e ITSM alle temperature di 10, 20 e 30°C. Infine si è voluta valutare la bontà della stesa attraverso prove con LWD Dynatest e Zorn

Dall’analisi dei risultati (in prequalifica e in stesa) si è osservato come, la presenza di polverino di gomma conferisca alla miscela una migliore capacità di addensamento iniziale, salvo poi diminuire in fase di maturazione, sia per il processo di maturazione in se che per il ritorno elastico cui è soggetto il polverino, il quale si traduce in una espansione del provino.

Per quanto riguarda la resistenza a trazione indiretta si è visto come in prequalifica la maggior rigidità del misto cementato privo di gomma fornisca valori di resistenza più elevati a fronte di una deformazione più contenuta. In stesa invece il misto cementato con polverino, confezionato a 180 giri di pressa giratoria, ha fornito valori di resistenza più elevati rispetto la miscela senza, probabilmente per le condizioni climatiche incerte a cui il materiale privo di rubber è stato soggetto in fase di lavorazione.

Anche i valori dei moduli determinati con prova ITSM hanno conservato il trend già evidenziato nelle prove a ITS, ovvero più alti per la miscela contenente rubber e più bassi per quella senza. La cosa interessante emersa da questa prova tuttavia, è che il polverino di gomma si è dimostrato poco sensibile alla variazione di temperatura,

difatti il gap tra i moduli ricavati alle tre temperature (10, 20, 30 °C) si mantiene costante, tanto per la miscela con polverino, quanto per quella senza.

Per valutazione dell'omogeneità di stesa, sono stati utilizzati due apparecchi LWD, Dynatest e Zorn, le prove sono state effettuate circa 10 giorni dopo la fine dei lavori alla temperatura di 2 °C, su 3 punti di controllo, distribuiti in 10 sezioni : 6 per il misto cementato con polverino, 2 per quello senza, 1 relativa a una fascia intermedia.

Dall'analisi dei moduli ottenuti si è potuto constatare come sia presente una buona omogeneità sia nello strato contenente gomma quanto in quello senza, in oltre il valore del modulo scende nel passaggio dal tratto con polverino a quello senza, in virtù di quello già evidenziato sia nei valori dei moduli ITSM che in quelli di resistenza a trazione indiretta.

Il suddetto oggetto di ricerca, è da inquadrarsi in un ottica ecosostenibile e soprattutto innovativa, dati i pochi studi tecnici e sperimentali, sull'impiego del polverino di gomma in conglomerati bituminosi e soprattutto, come nel caso in analisi, nei misti cementati riciclati a freddo. Per questa ragione i risultati di questa sperimentazione, non devono essere considerati come punto di arrivo ma come un punto di partenza, per l'applicazione di un materiale che gode di molteplici proprietà e che se opportunamente inserito nelle miscele potrebbe garantire molti benefici.

Bibliografia

- Cristina Rapisarda Sassoon, “Per uno sviluppo durevole e sostenibile”, Network sviluppo sostenibile, 2005
- Donati, Antonini, “Il mattone ritrovato”, Bologna, 2004.
- Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997 n.22 (Decreto Ronchi), attuazione delle Direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi, 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio.
- www.rete.toscana.it
- Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, “Riciclo di rifiuti da demolizione: un contributo all’ecobilancio”, Palermo, 1998.
- Avagnano, “L’approvvigionamento di materiali inerti per opere civili: problemi e prospettive” , Cave e Cantieri, 1993.
- Iacuzzi R., “Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie”, AIAT.
- Foschi R., “Il presente e il futuro del riciclaggio in Italia”, Le Strade n°10, Ottobre, 1999.
- www.edilportale.com
- Accordo di programma per il recupero dei residui da costruzione e demolizione nella Provincia di Bologna approvata da Consiglio Provinciale con Delibera n.70 del 24/07/2001 e modificato con Delibera Consiliare n.90 del 23/07/2002.
- www.siteb.it
- Muncy S. G., “Cold in-place recycling practices in North America”, Eurasphalt & Eurobitume 1993, pp.885-889, Stoccolma, 16-18 Giugno 1993.
- Associazione mondiale della strada – AIPCR, comitato nazionale italiano, “Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali”, ANAS s.p.a., 25° Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 Ottobre 2006.
- Decreto Legislativo 3 Aprile 2006 n.152, “Norme in materia ambientale”, supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, 14/04/2006.
- www.vallizabban.com
- Luca Merlo “Una nuova vita per scarti e articoli fuori uso" da www.assorigom.com

- E.Antonini, A.Costa, A.Perrotta, “Demolire per riciclare: strumenti e procedure per la valorizzazione dei rifiuti da costruzione e demolizione”, Convegno Internazionale Crolli Affidabilità Delle Strutture Civili Università degli studi di Napoli Federico II, 15-16 Maggio 2003
- Manutenzione e risanamento delle pavimentazioni stradali: Ruolo del riciclaggio a freddo”, estratto da www.viastrade.it
- “Emulsioni bituminose: applicazioni suggerimenti e note tecniche”, SITEB Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade
- www.siiv.it
- “Rigenerazione a freddo dei conglomerati bituminosi” rivista le Strade e Autostrde n.3 Maggio-Giugno 1997
- Brochure fornita dall’Associazione Ecopneus, “Il futuro dei pneumatici fuori uso oggi”
- Mincarini M., Settore Rifiuti Industriali, ENEA, “Il ciclo di produzione, consumo e recupero della gomma in Italia”, Osservatorio di normativa ambientale, 30 settembre 1998
- Normativa UNI EN 12697-10, *“Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 10: Compactability”*.
- Normativa UNI EN 12697-31, *“Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor”*.
- Normativa UNI EN 12697-26, *“Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness”*
- Operational devices for compaction optimization and quality control

(Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)

D. Adam & F. Kopf *Department of Civil Engineering*, *Vienna University of Technology, Austria*

- 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements - Thessaloniki, Greece, 1-3 June 2011- Comparing Light Weight Deflectometers to standardize their use in the compaction control
- Giulio Dondi, Matteo Pettinari, Cesare Sangiorgi, Piergiorgio Tataranni – the use of Crumb Rubber in Cold Recycled Rubber and Cryogenic Crumb Rubber

Ringraziamenti

Un ringraziamento sincero va sicuramente al Prof. Simone per la disponibilità e all’Ing. Pettinari per il supporto tecnico e morale per la realizzazione di questo elaborato, grazie davvero.

Più che un ringraziamento, sento invece di dover fare una dedica a mia madre, una donna straordinaria che non smetterò mai di ammirare, il suo esempio mi ricorda ogni giorno quanto siano importanti la parola tenacia e lavoro.

La seconda dedica va sicuramente a mio padre…questa è la seconda volta che ti dedico la tesi ed è la seconda volta che tu non sei qua giù con me, spero tanto che tu mi stia guardando e spero ancora una volta di averti reso fiero in questa come nelle altre cose, se riuscissi a diventare anche solo la metà dell’uomo che eri mi potrei ritenere realizzato.

Per il resto vorrei solo ringraziare tutte le persone che mi vogliono davvero bene, quelle che mi sono vicine tutti i giorni.

In fine vorrei chiudere con una frase che spero sia di buon auspicio in questo periodo di crisi, dove la difficoltà di impiego oramai interessa tutti noi giovani, compresa la nostra categoria.

“*La crisi è la più grande benedizione per le persone e le nazioni, perché la crisi porta progressi*”

Albert Einstein